

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Асинхронный электропривод насоса теплосети

УДК 681.51:66.028:622.765.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4А1	Гордеев Евгений Борисович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гнеушев В.В.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова А.А.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

_____ А.С. Ивашутенко

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4А1	Гордееву Евгению Борисовичу

Тема работы:

Асинхронный электропривод насоса теплосети

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3483/с от 06.05.2019г
---	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.
---------------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	введение; описание технологического процесса; обоснование и выбор системы электропривода; выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода; расчет статических и динамических характеристик, социальная ответственность проекта; финансовый менеджмент; заключение.
Перечень графического материала	<ul style="list-style-type: none"> - схема кинематическая; - схема электрическая принципиальная; - схема электрическая функциональная; - схема электрическая структурная; - демонстрационный лист; - технико-экономические показатели;
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна
Социальная ответственность	Сотникова Анна Александровна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.04.2019г.
---	--------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		
Старший преподаватель	Гнеушев В.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5Г4А1	Гордеев Евгений Борисович		.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

Период выполнения весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврской работы

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
23.05.2019	Основная часть	60
15.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
17.05.2019	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гнеушев В.В.			

СОГЛАСОВАНО:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

Реферат

Представленная выпускная квалификационная работа содержит 104 страниц, 14 таблиц, 31 рисунок, 25 источников литературы, приложение.

Выпускная квалификационная работа посвящена вопросам разработки электропривода магистрального насоса системы теплоснабжения района, предназначенного для циркуляции теплоносителя по четырём параллельным контурам отопления. Рассмотрена методика выбора насосного оборудования.

За базовый электропривод принят серийно выпускаемый комплектный преобразователь частоты типа FDU 40-090 СЕВ производства шведской фирмы Emotron. Проведено обоснование выбора, а также анализ основных возможностей преобразователя частоты.

В выпускной квалификационной работе построена модель асинхронного двигателя, на базе которой реализованы законы скалярного и векторного частотно-токового управления. Построены соответствующие имитационные модели в программной среде MATLAB. Для скалярного управления подобраны оптимальные параметры задатчика интенсивности, а также произведён расчёт статических характеристик. Для системы векторного управления проведён оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регуляторов контуров тока, потока и давления. Произведён расчёт переходных процессов в электроприводе для построенных моделей.

Помимо этого, в работе рассмотрены вопросы техники безопасности и экологичности проекта, проведен расчёт и анализ пусконаладочных работ.

Содержание

1. Технологический процесс	9
1.1 Краткое описание системы теплоснабжения	9
1.2 Технологическая схема.....	10
1.3 Выбор насоса	10
1.4 Основные параметры насоса.....	15
1.5 Регулирование потока.....	17
1.6 Датчик давления.....	18
2 Выбор двигателя.....	19
2.1 Проверка двигателя по мощности	19
2.2 Расчёт основных параметров и характеристик асинхронного электродвигателя.....	20
3 Механическая система РЭП.....	27
3.1 Кинематическая схема механизма	27
3.2 Расчетная схема замещения механической системы	28
4 Выбор преобразователя частоты	30
4.1 Принципы построения статических преобразователей частоты для электроприводов переменного тока	30
4.2 Преобразователь частоты FDU 40-090 СЕВ.....	33
5 Статические характеристики скалярного управления регулируемым электроприводом насоса.....	35
5.1 Регулирование скорости электропривода с помощью законов $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}, U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$	35
5.2 Регулирование скорости электропривода с помощью законов $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}, U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ с I·R – компенсацией.....	41
5.3 Структурная схема и имитационная модель асинхронного электродвигателя при законе управления $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$	42
5.4 Динамические характеристики асинхронного электродвигателя при использовании закона $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$	45
6 Векторное частотно-токовое управление РЭП насоса.....	50
6.5 Динамические характеристики системы векторного частотно-токового управления	62
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	63
7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	64
7.1 SWOT-анализ работы асинхронного электропривода магистрального насоса теплосети.....	64
7.2 Планирование технического проекта	68
7.2.1 Определение структуры работ в рамках технического проектирования	68
7.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	70

7.2.2 Составление сметы технического проекта	73
7.2.3 Полная заработная плата исполнителей ВКР	73
7.2.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	75
7.2.5 Накладные расходы	75
7.3 Формирование сметы технического проекта	75
7.4 Определение ресурсоэффективности проекта	76
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	79
8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	80
8.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	81
8.2 Организация рабочего места машиниста насосной станции.	82
8.3 Производственная безопасность	83
8.3.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	83
8.3.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды	87
8.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов	89
8.5 Экологическая безопасность	90
8.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	90
8.6.1 Защита электрооборудования от короткого замыкания и перегрузок	91
8.6.2 Воспламенения изоляции в следствии повышения температуры	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
CONCLUSION	96
Список использованных источников	98
Приложение А	100

1. Технологический процесс

1.1 Краткое описание системы теплоснабжения

Система теплоснабжения Ильинского района Западно-Сибирского металлургического комбината включает в себя четыре основных контура. Контуров параллельны. Система с открытым водоразбором подразумевает нестабильность рабочей точки насоса. В некоторых домах района воду для технических нужд берут прямо из системы теплоснабжения. Поэтому замкнутая система на практике является системой с изменяемым расходом и давлением. Следовательно, здесь необходима как регулировка давления в зависимости от расхода в весенний сезон с профилактическими работами, так и его поддержание на заданном уровне в зимний период. Изменение расхода осуществляется посредством дросселирования с помощью регулирующего клапана. Таким образом, изменяется сопротивление трубопроводной сети. Это очень простой, но крайне неэкономичный способ. Насос обычно пускается на минимальной нагрузке. Данный режим обеспечивается закрытием заслонки, отсекающей нагрузку от насоса. При отсутствии заслонки в момент пуска двигателя насоса не удаётся избежать гидравлических ударов в сети трубопроводов. Далее насос выводится на рабочую точку постепенным открытием заслонки. С учётом нестабильности питающего напряжения возможны его кратковременные провалы. Квадратичная зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от питающего напряжения определяет возможный останов двигателя уже при небольшом снижении напряжения. В результате при повторном запуске необходимо вновь закрывать заслонку и после пуска снова выводить насос на рабочую точку. Эти мероприятия увеличивают затраты на эксплуатацию и становятся вовсе бесполезными при частых и продолжительных провалах напряжения.

Часто после запуска насоса вовремя не открывается заслонка или она закрывается в процессе работы насоса. В системах теплоснабжения это приводит к кавитации. При вращении колесо насоса вспенивает непроточную нагретую воду, в результате чего происходит «закипание» жидкости с

образованием упругих пузырьков, которые разбивают крыльчатку. Явление сопровождается появлением шума.

1.2 Технологическая схема

На рисунке 1 приведена схема системы теплоснабжения котельной. Для подогрева воды в системе смонтированы котлы $K_1 - K_5$, работающие на твёрдом угле. На котлах установлены датчики давления и температуры $P_1 - P_5$, $T_1 - T_5$. Циркуляция воды обеспечивается насосами $H_1 - H_3$. Насос H_3 – новый с датчиком давления P_7 и механическим фильтром Φ_1 . Для предотвращения обратного тока воды через насос предусмотрены обратные клапаны $Z_8 - Z_{10}$. Клапаны $Z_5 - Z_7$ – запорно-регулирующие. На входе системы также установлены большой фильтр-отбойник Φ_2 , запорный клапан Z_4 , входные датчики температуры T_6 и давления P_8 .

1.3 Выбор насоса

Отправной точкой при подборе циркуляционного сетевого насоса системы теплоснабжения является определение потребности всех зданий в тепле, рассчитанной для наиболее холодного времени года. При профессиональном проектировании этот показатель определяется программно. Ориентировочно его можно вычислить по площади обогреваемого помещения. Согласно европейским стандартам на отопление 1 м^2 в доме с 1–2 квартирами необходимо 100 Вт, а для много квартирных домов 70 Вт. Если состояние здания не отвечает нормативам, проектировщик берёт в расчёт более высокое удельное потребление тепла. Для жилых домов с улучшенной теплоизоляцией и производственных помещений требуется 30 – 50 Вт/ м^2 . В России подобные стандарты для домов с 1 – 2 квартирами пока не определены. СНиП 2.04.07-86* «Тепловые сети» рекомендует рассчитывать максимальный тепловой поток на отопление 1 м^2 общей площади жилых домов, строящихся с 1985 года по новым типовым проектам, по следующим укрупнённым показателям:

- для 1 – 2-этажных зданий – 173 Вт/м² при расчётной температуре наружного воздуха – 25°C и 177 Вт/м² при – 30°C;
- для 3 – 4-этажных зданий – соответственно 97 и 101 Вт/м².

Определив потребление тепла $SG = 5960458,4$ ккал, следует перейти к расчёту требуемой производительности насоса. В приложении к СНиП 2.04.05-91* приведена следующая формула:

$$Q = \frac{3,6 \times SG}{c \times \Delta T}; \quad [\text{кг} / \text{ч}] \quad (1.1)$$

где c – удельная теплоёмкость воды, равная 4,2 кДж/кг·°C;

ΔT – разница температур в падающем и обратном трубопроводах схемы отопления ($\Delta T = 22^\circ\text{C}$);

Для пересчёта полученной величины в м³/ч необходимо её разделить на плотность воды при расчётной температуре; при 80°C она составляет 971,8 кг/м³.

Итоговую формулу для расчёта производительности насоса при учёте записи теплотер в килокалориях можно упростить:

$$Q = \frac{SG}{\Delta T} = \frac{5960458,4 \times 10^{-3}}{22} \gg 275 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (1.2)$$

Кроме необходимой подачи насос должен обеспечивать давление, достаточное для преодоления сопротивления трубопроводной сети. Для этого необходимо определить потери в наиболее протяжённой магистральной линии. Система теплоснабжения является четырехконтурной. Расчёт производится для наиболее протяжённого контура по заданным длинам и сечениям магистральных путей $H = 45$ м.

Рабочей характеристикой насосного агрегата называют зависимость между подачей насоса Q , м³/ч; и развиваемым им напором H , м. Напор – величина, выражающая удельную механическую энергию жидкости в данной точке потока.

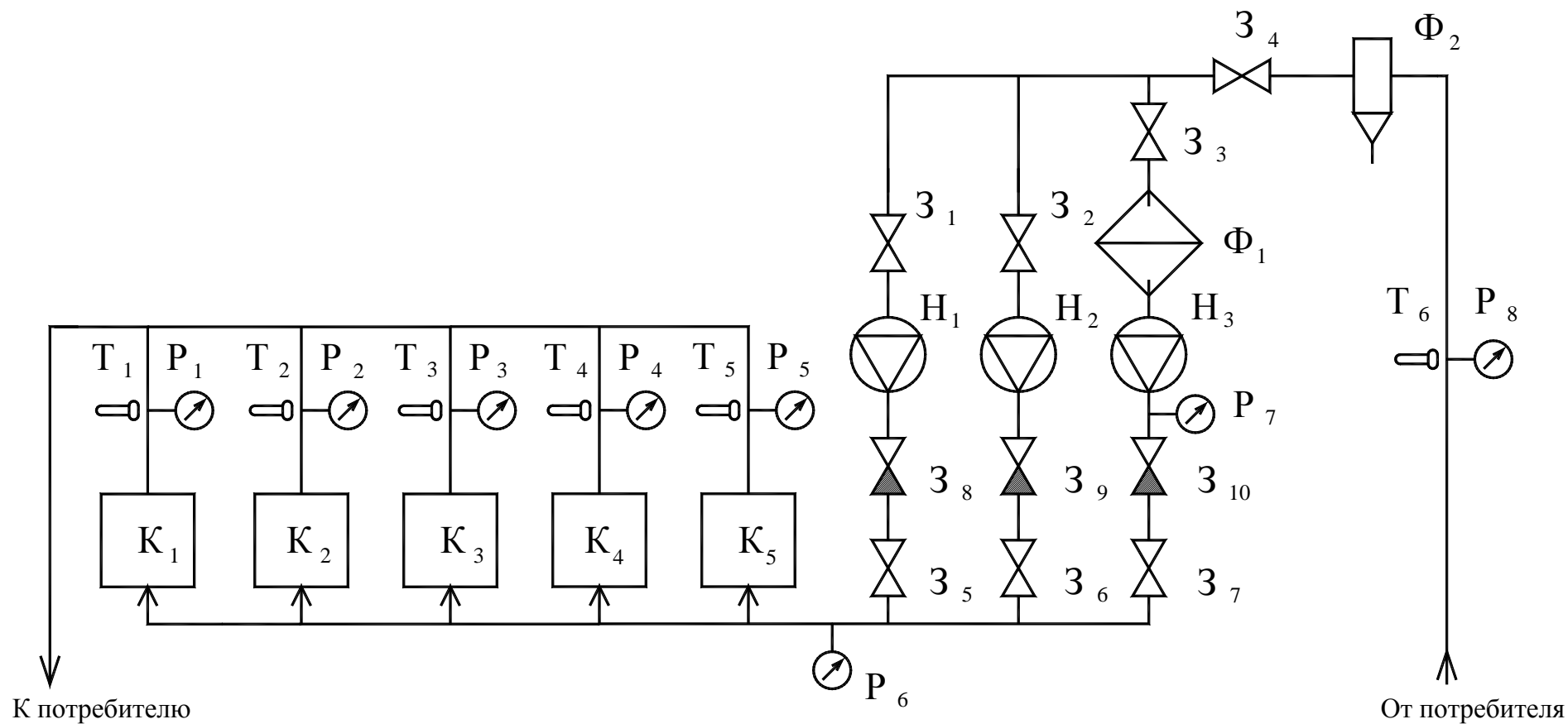


Рисунок 1 – Технологическая схема котельной системы теплоснабжения

Т – датчик температуры; Р – датчик давления; З – клапан; К – водонагревательный котёл; Φ – фильтр; Н – насос;.

Напор равен высоте, на которую может подняться жидкость над поверхностью отсчёта, выражается в метрах.

Для нормальных условий работы основного центробежного насоса необходим подпор жидкости на его входе, который обычно создаётся вспомогательным подпорным насосом. В рассматриваемой системе данный насос включается при снижении давления на входе.

В настоящее время в качестве циркуляционных широко применяются насосы с «сухим» ротором. В них электродвигатели не соприкасаются с перекачиваемой водой. К ним относятся традиционные консольные, моноблочные, а также Inline-насосы [1].

Используя заданные и вычисленные параметры системы, производится выбор насоса. Для этого использована программа выбора насосного оборудования международного концерна Grundfos: WinCAPS ver 7.42.05 ALL. Последовательность действий при работе с программой:

1. Выбираем закладку «Выбор параметров»
2. Далее в окне задаём требуемые параметры (см. рисунок 2) и нажимаем «Начало выбора параметров»

Рисунок 2 – Рабочее окно программы Grundfos – WinCAPS ver 7.42.05 ALL

На рисунке 3 приведены следующие характеристики: насоса $H = f(Q)$; магистрали; мощности двигателя $P_2 = f(Q)$; напора на входе $NPSH = f(Q)$; КПД насоса $\eta = f(Q)$.

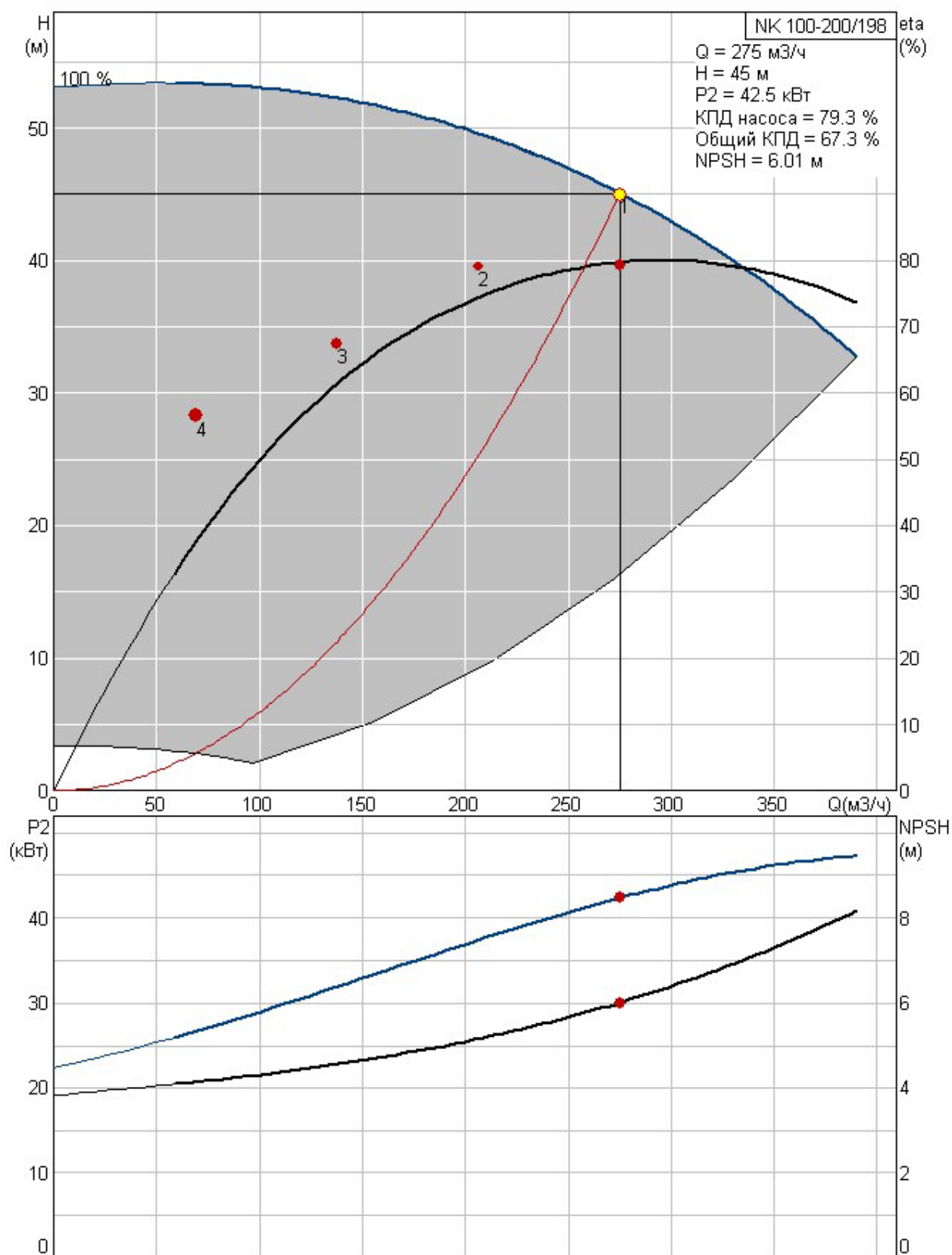


Рисунок 3 – Характеристики насоса

Данные характеристики являются основой для подбора насоса. Программа подобрала насос NK 100 – 200/198, где 100 – номинальный диаметр выходного патрубка; 200 – номинальный диаметр рабочего колеса, 198 – фактический диаметр рабочего колеса в миллиметрах.

1.4 Основные параметры насоса

Насос предназначен для подачи чистых или слегка замутнённых жидкостей без абразивных или длиноволокнистых включений и веществ, агрессивных по отношению к материалу деталей насоса. Области применения:

- Отопительное оборудование.
- Системы водоснабжения.
- Системы вентиляции и кондиционирования.
- Перекачивание воды в системах водяного охлаждения.
- Перекачивание производственно-хозяйственной воды.
- Противопожарное оборудование.
- Дождевальные и ирригационные системы.

Одноступенчатый центробежный насос с горизонтальным расположением вала, осевым всасывающим и радиальным напорным патрубками. Размеры и технические характеристики насоса NK соответствуют стандарту EN 733, 10 бар, корпус и торцевое уплотнение насоса рассчитаны на давление 16 бар. Фланцы на всасывающем и напорном патрубках соответствуют EN 7005 PN 10/16. Все насосы гидравлически разгружены от осевой нагрузки в соответствии с ISO 1940 класс 6.3. Рабочее колесо гидравлически сбалансировано.

Параметры перекачиваемой жидкости:

Минимальная температура жидкости: -10°C

Максимальная температура жидкости: 120°C

Технические данные:

Тип уплотнения вала: BAQE; В – Резиновое сильфонное уплотнение, А –

Графит с диффузионным насыщением металлом (антифрикционное кольцо),

Q – Карбид кремния (контркольцо), E – EPDM (вспомогательное уплотнение).

Материалы насоса:

Материал, корпус насоса: Чугун; EN-JL1040 DIN W.-Nr.

Class 35-40 ASTM

Материал, рабочее колесо: Чугун; EN-JL1040 DIN W.-Nr.

Class 35-40 ASTM

Условия для монтажа:

Максимальная температура окружающей среды: 60°C

Максимальное рабочее давление: 16 бар

Стандартное соединение труб: DIN

Размер входного патрубка насоса: DN 125

Размер выходного патрубка насоса: DN 100

Остальное: Нетто-вес: 402 кг

Насос поставляется в смонтированном состоянии и состоит из насосной части, плиты-основания, муфты с защитным кожухом и электродвигателем в соответствии с DIN 24 259.

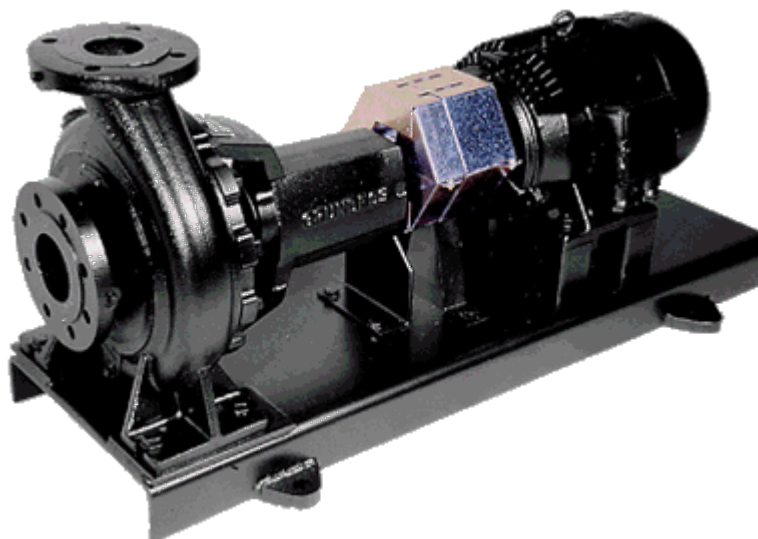


Рисунок 4 – Насос с двигателем в сборе

Таблица 1 – Составляющие компоненты насоса

Поз.	Наименование	Поз.	Наименование
1	Корпус насоса	31	Распорная втулка к торцевому уплотнению
3	Корпус подшипника	36	Крышка корпуса
4	Рабочее колесо	43	Шайба граверная
7а	Вал	44	Шайба для фиксации рабочего колеса
15	Контркольцо	71	Стяжной болт
16	Торцевое уплотнение	90	Пружинное кольцо
17	Призматическая шпонка	94	Шпонка для муфты
18	Установочная гайка	99	Опора
19	Шарикоподшипник 6306-2Z-C3	102	Крышка подшипника
20	Шарикоподшипник 6306-2Z-C3	103	Крышка подшипника
25	Пробка с резьбой	189а	Шпилька
26	Пробка для слива	190	Гайка
28	Уплотнительное кольцо		

1.5 Регулирование потока

Наиболее простым и часто применяемым методом регулирования скорости насоса является уменьшение сечения напорного трубопровода, то есть создание дополнительного сопротивления потоку воды, что достигается закрытием регулирующего органа клапана. При этом в результате увеличения гидравлического сопротивления в напорной линии насосы начинают работать с меньшей подачей и большим напором, а давление после регулирующего органа снижается. Поскольку каждой степени закрытия регулирующего органа соответствует определённая потеря напора, можно получить любой режим работы насоса вплоть до нулевой подачи.

Достоинством этого метода является то, что процесс дросселирования легко поддаётся автоматизации и дистанционному управлению и не требует установки специального дополнительного оборудования. Однако при этом методе регулирования снижается коэффициент полезного действия насосов и увеличивается удельный расход электроэнергии. При дросселировании обычно применяют схему с установкой регулирующего органа на выходе насосной станции. Перспективной альтернативой данному методу

регулирования является частотное регулирование скорости асинхронного электродвигателя. Для данного насоса не требуется большой диапазон изменения скорости. Поэтому здесь опасные малые скорости, при которых двигатель может перегреваться не требуются.

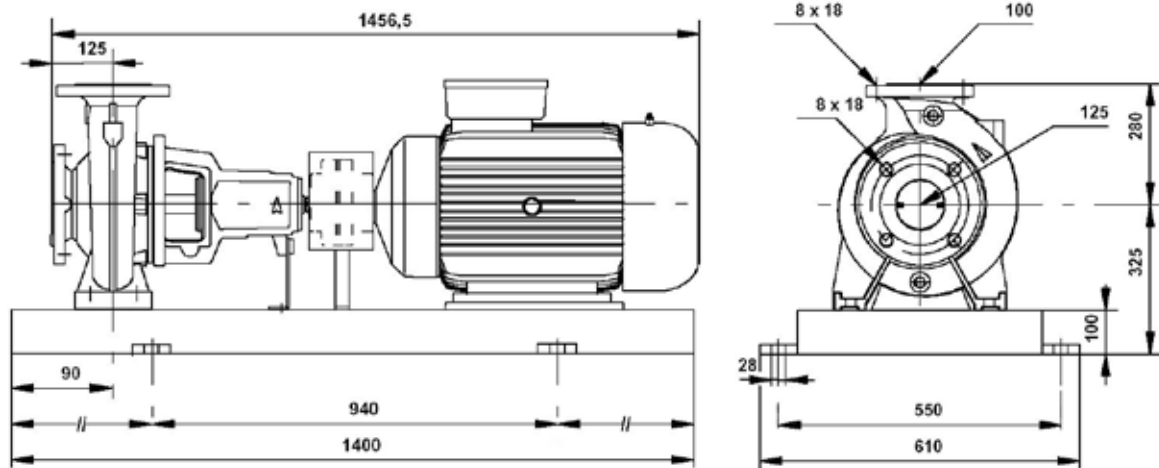


Рисунок 6 – Насос с двигателем с установочными и габаритными размерами

1.6 Датчик давления

Для контроля давления на выходе насоса необходим датчик давления. Выбор датчика осуществляется в соответствии с рабочими характеристиками и возможностью сопряжения с другим оборудованием. Выбираем датчик ДМ5007 производства ОАО «Манотомь» [3, стр. 30].

Датчик предназначен для непрерывного преобразования избыточного давления в унифицированный токовый сигнал 0 – 5 или 0 – 20 мА в условиях неагрессивных сред. Изготовлен на основе тензорезистивных чувствительных элементов. Состоит из блока чувствительного элемента и электронного преобразователя. Блок состоит из штуцера, выполненного из коррозионностойкого сплава, коррозионностойкого разделителя и тензочувствительного элемента. Электронный преобразователь расположен на печатной плате и помещён в корпус с герметизирующим резиновым кольцом. На торце корпуса расположены клеммная колодка и регулировочные отверстия для коррекции минимального и максимального значений токового выхода.

Основные технические характеристики:

Пределы измерений в кгс/см²: от 0 до 6.

Рабочая температура окружающей среды: от -40 до +70°C

Средний срок службы 8 лет

Напряжение питания 19 (42) В

Класс точности 0,5

Степень защиты IP65

Масса прибора не более 0,45 кг

2 Выбор двигателя

2.1 Проверка двигателя по мощности

Мощность двигателя выбранного насоса по программе должна быть не менее 42,4 кВт (см. рисунок 3). Проверим данную величину:

$$P_{\text{эд}} = \frac{g \times Q \times H}{h_{\text{н}} \times 3600} = \frac{9,81 \times 275 \times 45}{0,795 \times 3600} = 42,418 \text{ кВт}, \quad (2.1)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

В соответствие с ISO 5199 обеспечивается запас по мощности двигателя. Поэтому мощность двигателя должна быть не менее 45 кВт. По данной величине и рекомендациям производителя насоса, концерна Grundfos [1, раздел 5, стр. 16], выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии MMG. Паспортные данные двигателя MMG225M приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Паспортные данные двигателя MMG225M

Заданные величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Фазное напряжение обмотки статора $U_{1л} = 380$ В	$U_{1ф}$	В	220
Мощность двигателя	$P_{дв}$	кВт	45
Номинальная скорость ротора	n_H	об/мин	2950
КПД двигателя	η_H	о.е.	0,92
Синхронная частота вращения ротора	n_0	об/мин	3000
Коэффициент мощности двигателя	$\cos \varphi_H$	о.е.	0,88
Кратность пускового тока	k_i	о.е.	7,9
Кратность пускового момента	k_M	о.е.	2,4
Кратность максимального момента	$k_{макс}$	о.е.	3

2.2 Расчёт основных параметров и характеристик асинхронного электродвигателя

Произведём расчёт основных параметров асинхронной машины для построения механической и электромеханической характеристик асинхронного электродвигателя.

Величина синхронной угловой скорости

$$\omega_0 = \frac{p \times n_0}{30} = \frac{3,14 \times 3000}{30} = 314,159 \text{ рад/с}; \quad (2.2)$$

Номинальное скольжение

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{3000 - 2950}{3000} = 0,0167 \text{ о.е.}; \quad (2.3)$$

Номинальный ток обмотки статора двигателя

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \times U_{1ф} \times \cos \varphi_H \times \eta_H} = \frac{45 \times 10^3}{3 \times 220 \times 0,88 \times 0,92} = 84,22 \text{ А}; \quad (2.4)$$

Современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10 – 15 % меньше номинальной. Коэффициент мощности при нагрузке равной $0,75 \times P_H$ значительно отличается от мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие сильно зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведённой на рисунке 6.

Коэффициент мощности при частичной нагрузке

$$\cos j_{p*} = 0,99 \times \cos j_H = 0,99 \times 0,88 = 0,871 \text{ о.е.}; \quad (2.5)$$

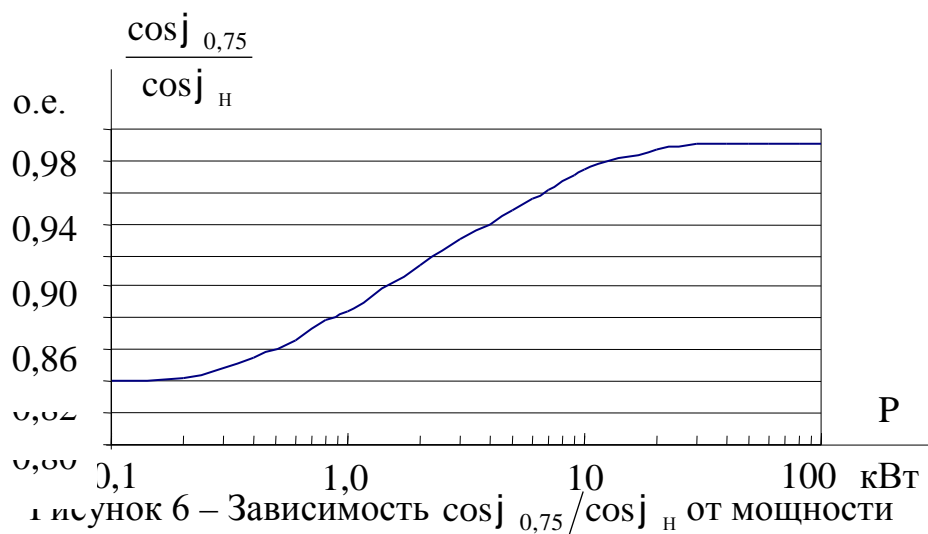
Коэффициент загрузки двигателя принимаем $p_* = 0,75$ из-за указанных выше особенностей проектирования асинхронных двигателей.

Тогда ток статора двигателя при частичной нагрузке равен:

$$I_{11} = \frac{p_* \times P_H}{3 \times U_{1\phi} \times \cos j_{p*} \times \eta_H} = \frac{0,75 \times 45 \times 10^3}{3 \times 220 \times 0,871 \times 0,92} = 63,801 \text{ А}; \quad (2.6)$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$\begin{aligned} I_0 &= \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* \times I_{1H}(1 - S_H)/(1 - p_* \times S_H)]^2}{1 - p_* \times (1 - S_H)/(1 - p_* \times S_H)^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{63,801^2 - [0,75 \times 84,22 \times (1 - 0,0167)/(1 - 0,75 \times 0,0167)]^2}{1 - [0,75 \times (1 - 0,0167)/(1 - 0,75 \times 0,0167)]^2}} = \quad (2.7) \\ &= 16,098 \text{ А}; \end{aligned}$$



Из формулы Клосса следует соотношение для расчета критического скольжения:

$$S_{кр} = S_H \times \frac{k_{МАКС} + \sqrt{k_{МАКС}^2 - [1 - 2 \times S_H \times b \times (k_{МАКС} - 1)]}}{1 - 2 \times S_H \times b \times (k_{МАКС} - 1)} =$$

$$= 0,07 \times \frac{3 + \sqrt{3^2 - [1 - 0,8 \times 0,0167 \times 2 \times (3 - 1)]}}{1 - 2 \times 0,0167 \times 0,8 \times (3 - 1)} = 0,1028 \text{ о.е.}, \quad (2.8)$$

где в первом приближении коэффициент $b = 0,8$.

Предварительно для расчёта активных и индуктивных сопротивлений (параметров схемы замещения) обмоток статора и ротора определяются следующие коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \times k_i \times I_{IH}} = 1 + \frac{16,098}{2 \times 7,9 \times 84,22} = 1,012; \quad (2.9)$$

$$A_1 = \frac{m \times U_{1\Phi}^2 \times (1 - S_H)}{2 \times C_1 \times k_{МАКС} \times P_H} = \frac{3 \times 220^2 \times (1 - 0,0167)}{2 \times 1,012 \times 3 \times 45 \times 10^3} = 0,522; \quad (2.10)$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{A_1}{(b + 1/S_{кр}) \times C_1} = \frac{0,522}{(0,8 + 1/0,1028) \times 1,012} = 0,04903 \text{ Ом}; \quad (2.11)$$

Активное сопротивление обмотки статора определяется по следующему выражению

$$R_1 = C_1 \times R_2' \times b = 1,012 \times 0,04903 \times 0,8 = 0,0397 \text{ Ом}; \quad (2.12)$$

Параметр g для определения сопротивления короткого замыкания

$$g = \sqrt{(1/S_{кр}^2) - b^2} = \sqrt{(1/0,1028^2) - 0,8^2} = 9,697; \quad (2.13)$$

$$X_k = g \times C_1 \times R_2' = 9,697 \times 1,012 \times 0,04903 = 0,48116 \text{ Ом}; \quad (2.14)$$

Тогда, индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, приближённо может быть рассчитано:

$$X_2' = 0,58 \times X_k / C_1 = 0,58 \times 0,48116 / 1,012 = 0,2757 \text{ Ом}; \quad (2.15)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора

$$X_1 = 0,42 \times X_k = 0,42 \times 0,48116 = 0,2021 \text{ Ом}; \quad (2.16)$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания определяется через значение ЭДС обмотки статора

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1H} \times \cos j_{1H} - R_1 \times I_{1H})^2 + (U_{1H} \times \sin j_{1H} + X_1 \times I_{1H})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \times 0,88 - 0,0397 \times 84,22)^2 + \\ &\quad + (220 \times \sqrt{1 - 0,88^2} + 0,2021 \times 84,22)^2} = 225,75 \text{ В}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{225,75}{16,098} = 14,024 \text{ Ом}. \quad (2.18)$$

Для построения механической характеристики двигателя определим критический момент машины в двигательном режиме

$$\begin{aligned} M_{кр} &= \frac{m \times U_{1\Phi}^2}{2 \times w_0 \times C_1 \times [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]} = \\ &= \frac{3 \times 220^2}{2 \times 314,159 \times 1,012 \times [0,0397 + \sqrt{0,0397^2 + (0,48116)^2}]} = \\ &= 439,8 \text{ Н} \times \text{м}; \end{aligned} \quad (2.19)$$

Задаваясь диапазоном изменения скольжения $S \in [-1, 1]$ с шагом 0,001, строим механическую характеристику асинхронного электродвигателя по формуле Клосса

$$M = \frac{2 \times M_{кр} (1 + a \times S_{кр})}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}} + 2 \times a \times S_{кр}}; \quad (2.20)$$

где коэффициент a равен: $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0,0397}{0,04903} = 0,81$;

тогда расчётное выражение для механической характеристики примет следующий вид:

$$M(S) = \frac{953,306}{\frac{0,1028}{S} + \frac{S}{0,1028} + 0,168} \text{ Н} \times \text{м};$$

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя изображена на рисунке 7, характеристика 1. Она справедлива только в области номинальных скоростей.

Попытаемся учесть изменение параметров асинхронной машины в момент пуска. При этом вид механической характеристики должен измениться. Для осуществления этого пункта задания вводим поправочные коэффициенты, домножаемые на величины активных и реактивных сопротивлений обмотки ротора:

$$R_2'(S) = R_2' \times f_1(S) = 0,04903 \times f_1(S) \text{ Ом};$$

$$X_2'(S) = X_2' \times f_2(S) = 0,2757 \times f_2(S) \text{ Ом};$$

Коэффициенты $f_1(S)$, $f_2(S)$ являются функциями скольжения. Эмпирические выражения для коэффициентов соответствующие данной модели асинхронного двигателя следующие:

$$f_1(S) = \frac{0.78 - 0.1 \times S^2 + 3 \times S^2 \times \sqrt{S}}{0.78 - 0.09 \times S^2 + S^2 \times \sqrt{S}};$$

$$f_2(S) = 1 - \frac{0.04 \times S - 0.65 \times S^2 + 1.05 \times S^2 \times \sqrt{S}}{0.4 + 0.065 \times S^2 \times \sqrt{S}}.$$

При этом должно соблюдаться условие, при котором величина активного сопротивления обмотки ротора при $S = 1$ имеет максимальное значение, а соответствующее реактивное сопротивление – минимальное, что соответствует физическим явлениям увеличения активного сопротивления за счёт эффекта вытеснения тока на поверхность обмотки ротора и насыщения зубцовой зоны ротора соответственно.

Соответствующим образом все ранее рассмотренные выражения, в которые последовательно подставляются $R_2'(S)$, $X_2'(S)$ также являются функциями скольжения. Поэтому итоговое выражение для механической характеристики асинхронной машины представляет собой достаточно сложное выражение. Механическая характеристика с учётом изменения сопротивлений обмотки ротора приведена на рисунке 7, характеристика 2.

По построенным механическим характеристикам проведём анализ основных данных, а также сравним их с паспортными.

1) Момент номинальный

$$M_{H(\text{паспорт})} = P_H / \omega_{\text{НОМ}} = 45 \times 10^3 / 308,9 = 145,68 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.21)$$

то же значение, но по формуле Клосса:

$$M(S) = \frac{953,306}{\frac{0,1028}{S_H} + \frac{S_H}{0,1028} + 0,168} = \frac{953,306}{\frac{0,1028}{0,01667} + \frac{0,01667}{0,1028} + 0,168} = 145,807 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

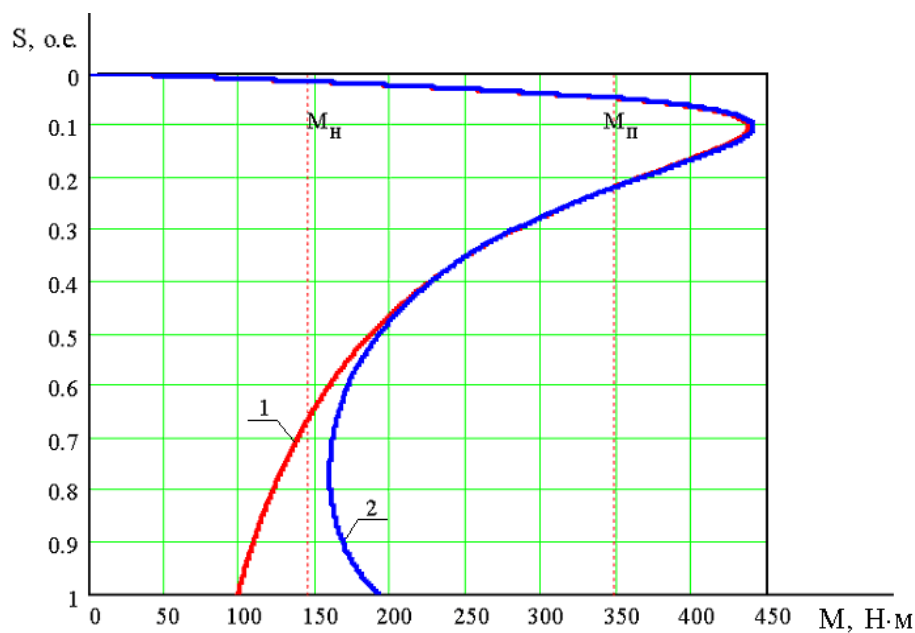


Рисунок 7 – Механическая характеристика асинхронного электродвигателя

2) Момент критический

$$M_{\text{КР}} = k_{\text{МАКС}} \times M_{H(\text{паспорт})} = 3 \times 145,68 = 437,04 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.22)$$

3) Пусковой момент

$$M_{\text{ПУСК}} = k_{\text{П}} \times M_{H(\text{паспорт})} = 2,4 \times 145,68 = 349,63 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.23)$$

то же значение, но для характеристики 1

$$M_{\text{ПУСК}} \big|_{S=1} = 95,97 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

для характеристики 2

$$M_{\text{ПУСК}} \big|_{S=1} = 180,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Для построения электромеханических характеристик воспользуемся следующим выражением для приведённого тока обмотки ротора

$$\begin{aligned} I_2(s) &= \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{\frac{R_1}{s} + \frac{R_2}{s} + (X_1 + X_2)^2}} = \\ &= \frac{220}{\sqrt{0,0397 + \frac{0,04903}{s} + (0,48116)^2}} \text{ A;} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Предельное асимптотическое значение тока ротора по выражению:

$$\begin{aligned} I_{2\text{пр}} &= \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,0397^2 + (0,48116)^2}} \\ &= 458,84 \text{ A;} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Критическое значение тока ротора

$$I_{2\text{кр}} = U_{1\Phi} / (X_1 + X_2) = 220 / (0,48116) = 460,42 \text{ A;} \quad (2.26)$$

Данное значение соответствует следующей величине скольжения

$$S_{2\text{кр}} = - R_2 / R_1 = - 0,04903 / 0,0397 = - 1,2351 \text{ о.е.}; \quad (2.27)$$

Для построения электромеханической характеристики тока обмотки статора воспользуемся следующим выражением:

$$\begin{aligned} I_1(s) &= \sqrt{I_0^2 + \left(1 + 2 \times a \times \sqrt{1 - a^2 \times S_{\text{кр}}^2}\right) \times [I_2(s)]^2} = \\ &= \sqrt{16,098^2 + 0,07 \times [I_2(s)]^2} \text{ A;} \end{aligned} \quad (2.28)$$

где коэффициент $a = I_0 / I_{2\text{пр}} = 16,098 / 458,84 = 0,0351$.

Задаваясь диапазоном изменения скольжения $S \in [-2, 1]$ с шагом 0,001, строим электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя по формулам для токов обмоток статора и ротора. Электромеханические характеристики двигателя приведены на рисунке 8.

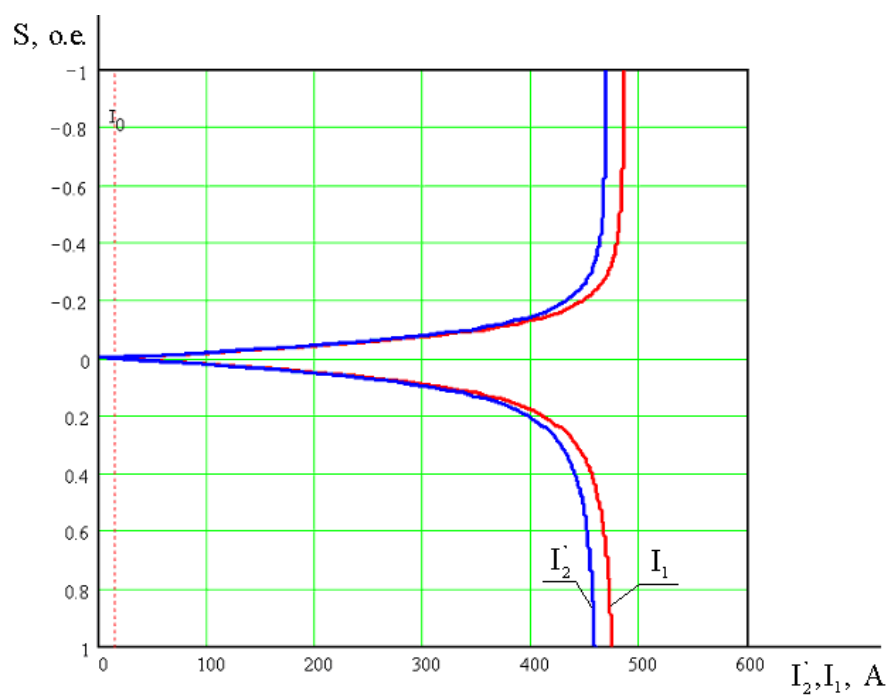


Рисунок 8 – Электромеханические характеристики асинхронного
Электродвигателя

3 Механическая система РЭП

3.1 Кинематическая схема механизма

Кинематическая схема механизма приведена на рисунке 9.

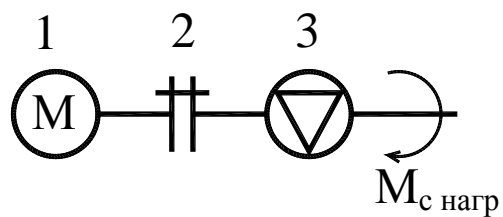


Рисунок 9 – Кинематическая схема механизма

На рисунке приняты следующие обозначения:

- 1 – электродвигатель (М),
- 2 – муфта,
- 3 – насос.

3.2 Расчетная схема замещения механической системы

Из рисунка 9 следует, что кинематическая схема механической части электропривода насоса не является достаточно сложной. В общем случае она состоит из двух инерционных масс и соединяющих их упругой связи. Поэтому структуру механической системы электропривода насоса сведём к двухмассовой механической системе (ДМС). Расчетная схема замещения ДМС приведена на рисунке 10.

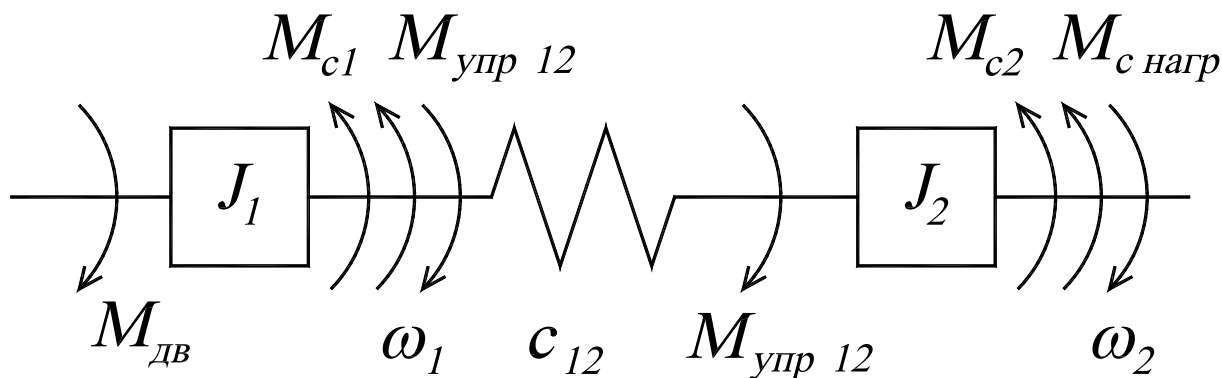


Рисунок 10 – Расчетная схема замещения механической системы

Определим параметры структурной схемы механической части электропривода центробежного насоса. Они соответствуют двухмассовой расчётной схеме замещения.

Момент инерции ротора двигателя и жёстко с ним связанной полумуфты:

$$J_1 = 0,55 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции насоса и жёстко с ним связанной второй полумуфты:

$$J_2 = 0,45 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Эквивалентная расчётная жёсткость механической связи между ротором двигателя и валом насосом:

$$C_{12} = 5060 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления соответствующий работе насоса с номинальной частотой вращения на закрытую заслонку [6, стр. 569]:

$$M_0 = 80,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент механических потерь асинхронного электродвигателя:

$$M_{c1} = 0,05 \times M_H = 0,05 \times 145,68 = 7,284 \text{ Н} \times \text{м}.$$

Момент потерь насоса:

$$M_{c2} = DM = 15 \text{ Н} \times \text{м}.$$

Основную долю $M_{c \text{ нагр}}$ составляет нагрузка, пропорциональная квадрату скорости:

$$M_{c \text{ нагр}} = \frac{DM_H - M_{c1} - DM}{w_{\text{НОМ}}^2} \ddot{w} = \frac{145,68 - 7,284 - 15}{308,9^2} \ddot{w} = 0,0013 \ddot{w} \text{ Н} \times \text{м} \quad (3.1)$$

Определим общие параметры схемы. Соотношение масс:

$$g = \frac{(J_1 + J_2)}{J_1} = \frac{0,55 + 0,45}{0,55} = 1,818. \quad (3.2)$$

Резонансная частота системы:

$$W_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 \times J_2}} = \sqrt{\frac{5060 \times (0,55 + 0,45)}{0,55 \times 0,45}} = 142,98 \text{ 1/с}. \quad (3.3)$$

Структурная схема ДМС в системе относительных единиц приведена на рисунке 11.

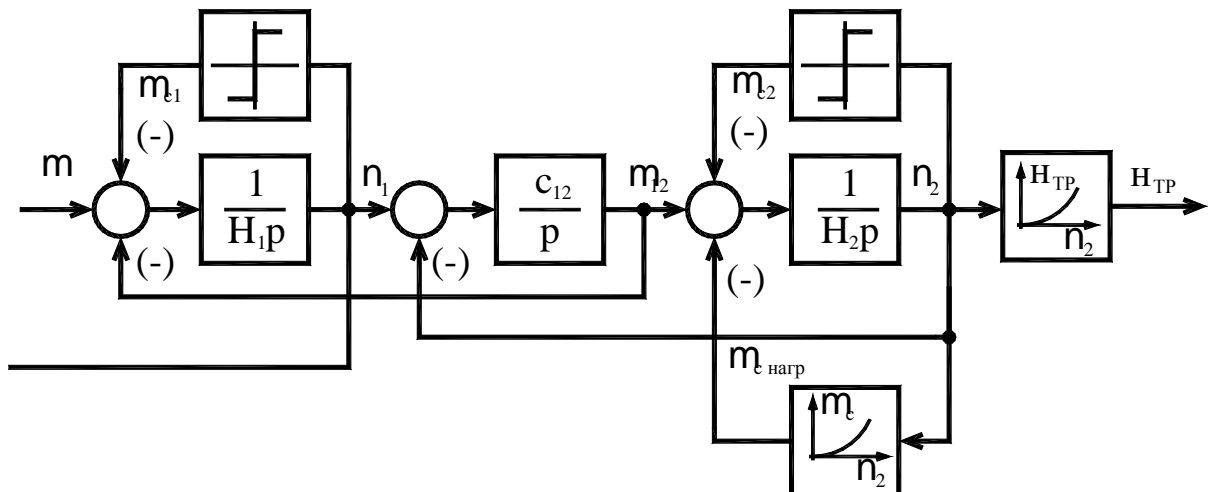


Рисунок 11 – Структурная схема двухмассовой механической системы

Резонансная частота второй массы при жесткой заделке первой:

$$W_{02} = \frac{W_{12}}{\sqrt{g}} = \frac{142,98}{\sqrt{1,818}} = 106,1 \text{ 1/с}. \quad (3.4)$$

В данном случае величины J_1 и J_2 соизмеримы, однако резонансная частота из-за большой жёсткости механической связи велика, а вентиляторная нагрузка является диссипативной нагрузкой, демпфирующей упругие колебания. Поэтому, если в системе нет условий для механического резонанса, т.е. отсутствуют возмущения, изменяющиеся с частотой, близкой $W_{12} = 142,98 \text{ 1/с}$, учитывать упругости не следует. Положив связь между массами абсолютно жёсткой, определим момент инерции привода:

$$J_s = J_1 + J_2 = 0,55 + 0,45 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Статический момент нагрузки:

$$M_c = M_{c1} + M_{c2} + M_{c_{\text{нагр}}} = 7,284 + 15 + 0,0013 \cdot \omega^2 = \text{Н} \cdot \text{м}. \quad (3.5)$$

Для построения модели электропривода приведём величины одномассовой механической системы в системе относительных единиц:

$$H_s = \frac{J_s \cdot \omega_b^2}{M_b \cdot \varphi} = \frac{1 \cdot 314,159^2}{176,93 \cdot 1} = 557,8 \text{ о.е.} \quad (3.6)$$

$$m_t = 0,126 + 0,7196 \cdot \omega_2^2 \text{ о.е.} \quad (3.7)$$

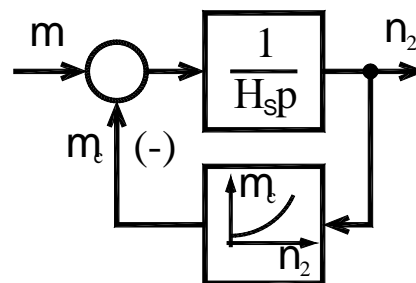


Рисунок 12 – Структурная схема одномассовой механической системы

4 Выбор преобразователя частоты

4.1 Принципы построения статических преобразователей частоты для электроприводов переменного тока

Преобразователи частоты (ПЧ) для электроприводов преобразуют переменное напряжение питающей сети в переменное трехфазное напряжение с регулируемой частотой, напряжением и током. В настоящее время ПЧ в

большинстве случаев выполняется на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей: силовых транзисторов, запираемых тиристоров, которые можно как открыть, так и закрыть сигналами, подаваемыми на их управляющие входы. Однако, сохранились ПЧ на полууправляемых ключевых элементах, которые открываются по цепи управления, а закрываются либо в моменты окончания протекания в них силового тока, либо путем подачи в силовую цепь вентиля отрицательного импульса тока от узлов коммутации.

По типу связи с питающей сетью ПЧ можно разделить на 2 класса [4]:

1. ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока, которые делятся на:

- Автономные инверторы напряжения (АИН);
- Автономные источники тока (АИТ).

В своей структуре оба типа содержат управляемый или неуправляемый выпрямитель, силовой фильтр в звене постоянного тока и инвертор, преобразующий постоянное напряжение или ток в цепи постоянного тока в соответствующие переменные величины заданной частоты.

2. Преобразователи частоты с непосредственной связью (ПЧНС).

Современное состояние рынка преобразователей частоты свидетельствует, что с появлением новейших конструкций и материалов полупроводниковых силовых элементов практически все производители приводной техники освоили серийный выпуск универсальных комплектных ПЧ на базе АИН. В связи с инвариантностью предложений производителей и активное позиционирование данного товара рассмотрим более подробно данную структуру ПЧ.

АИН в звене постоянного тока содержит индуктивно-ёмкостный фильтр либо только ёмкостной. В структуре имеет место однозначная зависимость напряжения в звене постоянного тока от напряжения на нагрузке, и поэтому он является источником напряжения. Благодаря наличию ёмкости, при работе инвертора как источника напряжения на активно-индуктивную нагрузку, каковым является АД, обеспечивается обмен реактивной энергией между АД и звеном постоянного тока. Кроме конденсатора для этой цели необходимы

обратные диоды D1–D6, включенные параллельно основным ключам T1–T6. Через эти диоды протекает ток в моменты возврата реактивной энергии от двигателя в емкость. Ток в цепи на участке между инвертором и емкостью при низких значениях коэффициента мощности нагрузки может менять направление. Форма напряжения на выходе инвертора определяется порядком переключения ключей T1–T6. Индуктивно-ёмкостный фильтр обеспечивает сглаживание пульсаций напряжения с выхода выпрямителя. Напряжение на выходе инвертора может регулироваться двумя способами:

- Изменением напряжения U_d в звене постоянного тока. В этом случае используется управляемый выпрямитель, а инвертор выполняет функции коммутатора фаз, формируя требуемую частоту, такой ПЧ называется АИН с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ);

- Широтно-импульсным регулированием напряжения (как в нашем случае) в инверторе, которое осуществляется модуляцией напряжения несущей частоты сигналом основной частоты. Такие ПЧ называются АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В них, как правило, для повышения КПД системы выпрямитель является неуправляемым. В этом случае в АИН отсутствует рекуперация энергии в питающую сеть.

В структурах электропривода с АИН, содержащих контуры регулирования токов статора с глубокими отрицательными обратными связями, совокупность АИН с контурами токов образуют источник тока.

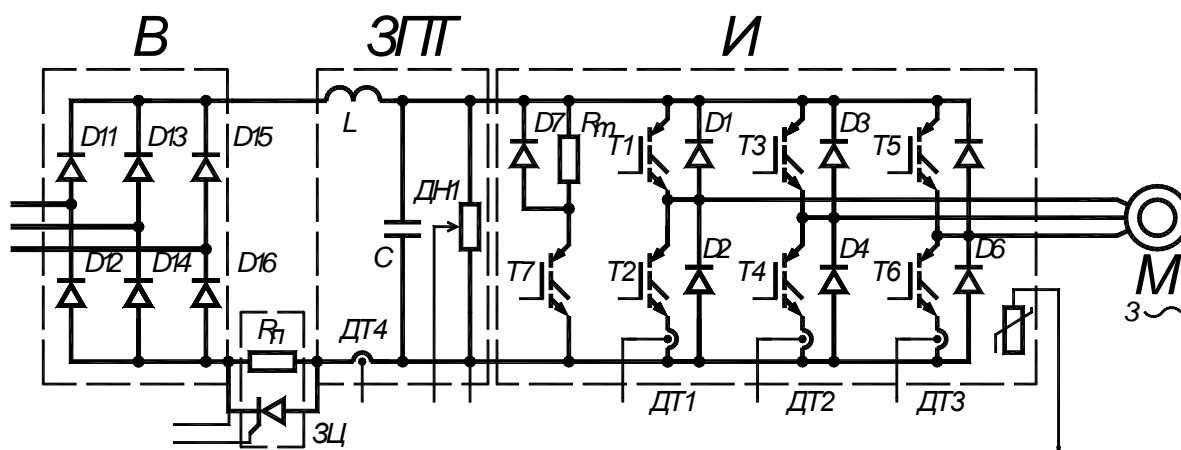


Рисунок 13 – Схемы силовой части АИН

Положительным качеством АИН является возможность работы его как источника напряжения, питающего одиночный двигатель или группу двигателей, в разомкнутых системах регулирования скорости, а также в режиме источника тока при построении замкнутых структур регулирования скорости АД с различными принципами управления. Поэтому АИН находит широкое применение в частотно-регулируемых электроприводах. Основные недостатки АИН:

- Высокие требуемые значения емкости фильтра, большие габариты конденсаторной батареи;
- Трудности обеспечения рекуперации электрической энергии в сеть в тормозных режимах. Для этого необходим дополнительный комплект трёхфазного мостового выпрямителя либо применение управляемого модуля выпрямителя.

4.2 Преобразователь частоты FDU 40-090 СЕВ

По указанным основным особенностям работы ПЧ с АИН можно подчеркнуть, что на данной силовой схеме возможно реализовать основные законы управления АД. Современный комплектный преобразователь частоты – это самодостаточное устройство работающее автономно. Структура преобразователя программно перестраиваемая с точки зрения реализации различных законов управления. Функции встроенных защит, самодиагностика позволяют свести к минимуму затраты на наладку. Микропроцессорные системы управления выполненная на базе двух микроконтроллеров позволяют обеспечить требуемые точностные характеристики. Выбор конкретного ПЧ связан с множеством нюансов как технического так и экономического характера. Среди основных отметим большое разнообразие компаний-производителей с разными ценовыми предложениями. Подбор преобразователя в этом случае произведён в соответствии с рекомендациями производителя и опыта эксплуатации данного электрооборудования. Насосы являются типичной нагрузкой для

асинхронного двигателя, причём достаточно удобной, т.к. характер нагрузки насоса снижает общие требования к системе управления. Поэтому многие фирмы-производители наряду с общепромышленными сериями, рассчитанными на высокودинамичные применения, предлагают и специальные разработки, ориентированные на применение с насосно-вентиляторной нагрузкой. Однако лицом фирмы по-прежнему остаются параметры и возможности высокотехнологичных общепромышленных серий, поэтому именно к их совершенствованию прилагаются основные усилия, в то время как насосное применение обеспечивается по остаточному принципу: для насосов предлагается использование либо таких же преобразователей, либо их модификаций в сторону упрощения. Такой подход, конечно, даёт небольшое снижение цены, но не использует весь потенциал простоты насосного применения, и тем более не учитывает некоторых специфических требований. Другим путём пошла шведская фирма Emotron AB организовав разработку «с нуля» специализированной насосно-вентиляторной серии преобразователей частоты. Такая стратегия привела к введению специализированных свойств преобразователя, например, программного монитора нагрузки, позволяющего отслеживать режимы «сухого хода», кавитации или работы на закрытую заслонку. Наличие дополнительной платы позволяет управлять дополнительно насосами, включая и выключая их по мере необходимости. Такая работа превращает преобразователь практически в контроллер насосной станции. В итоге в соответствии с питающей сетью, мощностью двигателя и характером нагрузки выбран преобразователь FDU 40-090 СЕВ шведской фирмы Emotron [2].

Основные специализированные функции:

- Пуск вращающегося двигателя,
- Встроенный ПИД регулятор,
- Преодоление провалов напряжения,
- Встроенный монитор нагрузки,

Копирование настроек в переносную панель управления,
Оптимизация поля,
Автоматический потенциометр,
Двойное время разгона / замедления,
Использование макросов,
Возможность управления 7 насосами одновременно.

Основные характеристики:

Напряжение питания: 3x380-415 В +10%/-15%,
Номинальный выходной ток: 90 А,
Ограничение тока, 120 с.: 108 А,
Входной ток: 85 А,
Входная частота: 50 / 60 Гц,
Выходная частота: 0-400 Гц,
КПД при номинальной мощности: 98 %,
Потери при $f_1 = 1,5$ кГц: 900 Вт,
Степень защиты IP20/IP54.

Более подробная информация приведена в руководстве по эксплуатации [2, стр. 73]

5 Статические характеристики скалярного управления регулируемым электроприводом насоса

5.1 Регулирование скорости электропривода с помощью законов

$$U_{1\phi} / f_1 = \text{const}, U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$$

В электроприводах со скалярным управлением для регулирования или стабилизации скорости используются различные соотношения между частотой и напряжением. Выбор конкретного соотношения зависит от характера момента нагрузки.

Для двигателя типа MMG225M управляемого от преобразователя частоты FDU 40-090 СЕВ, по паспортным данным, параметрам схемы

замещения рассчитаем и построим электромеханические и механические характеристики при питании его от статического преобразователя частоты по следующим законам управления:

$$U_{1\phi} / f_1 = \text{const}; \quad U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}, \text{ для частот питания } f_1 = 50; 40; 25; 10 \text{ Гц.}$$

Таблица 3 – Требуемые для расчета параметры схемы замещения

Заданные величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Активное сопротивление обмотки статора	R_1	Ом	0,0397
Активное сопротивление обмотки ротора	R'_2	Ом	0,04903
Индуктивное сопротивление статорной обмотки	X_1	Ом	0,2021
Индуктивное сопротивление роторной обмотки	X'_2	Ом	0,2757
Индуктивное сопротивление намагничивания	$X_{\text{мн}}$	Ом	14,024

Для закона управления $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$ асинхронным двигателем произведём расчёт электромеханических и механических характеристик при частотах 50; 40; 25; 10 Гц.

Определим значения относительных частот, напряжений и синхронных скоростей:

$$f_{1*} = \frac{f_{1j}}{f_{1H}} = \frac{\{50; 40; 25; 10\}}{50} = \{1; 0,8; 0,5; 0,2\} \text{ о.е.}; \quad (5.1)$$

$$U_{1j} = U_{1\phi} \times f_{1*} = 220 \times \{1; 0,8; 0,5; 0,2\} = \{220; 176; 110; 44\} \text{ В}; \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \omega_{0j} &= \omega_{0H} \times f_{1*} = 78,54 \times \{1; 0,8; 0,5; 0,2\} = \\ &= \{78,54; 62,83; 39,27; 15,708\} \text{ рад/с}; \end{aligned} \quad (5.3)$$

Расчёт электромеханических характеристик будем производить, подставляя в следующие выражения соответствующие для каждой

характеристики значения f_{1*} , U_{1j} , w_{0j} . Далее, задаваясь диапазоном значений w от нуля до соответствующего для каждой характеристики значения $w_{0j} \times 1,25$ с шагом $0,001 \times w_{0j}$, подставляем в выражение для относительного скольжения. На следующем этапе получившиеся значения относительного скольжения последовательно подставляем в выражение для тока обмотки ротора и статора.

$$S_j(w) = \frac{w_{0j} - w}{w_{0j}}; \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{2j}(w) &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{X_{KH}^2 \times f_{1H}^2 + \frac{R_1}{S_j(w)} + \frac{R_1 \times R_2}{S_j(w) \times X_{mH} \times f_{1*}}} = \\ &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{0,48116^2 f_{1*}^2 + \frac{0,0397}{S_j(w)} + \frac{0,0397 \times 0,04903}{S_j(w) \times 14,024 \times f_{1*}}}}; \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} I_{1j}(w) &= \sqrt{I_0^2 + \Gamma_{2j}^2(w) + 2 \times I_0 \times \Gamma_{2j}(w) \times \frac{X_{KH}}{\sqrt{\frac{R_1}{S_j(w)} + X_{KH}^2}}} = \\ &= \sqrt{14,024^2 + \Gamma_{2j}^2(w) + 2 \times 14,024 \times \Gamma_{2j}(w) \times \frac{0,48116}{\sqrt{\frac{0,0397}{S_j(w)} + 0,48116^2}}} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Построенные характеристики для данного закона управления двигателем изображены на рисунке 14.

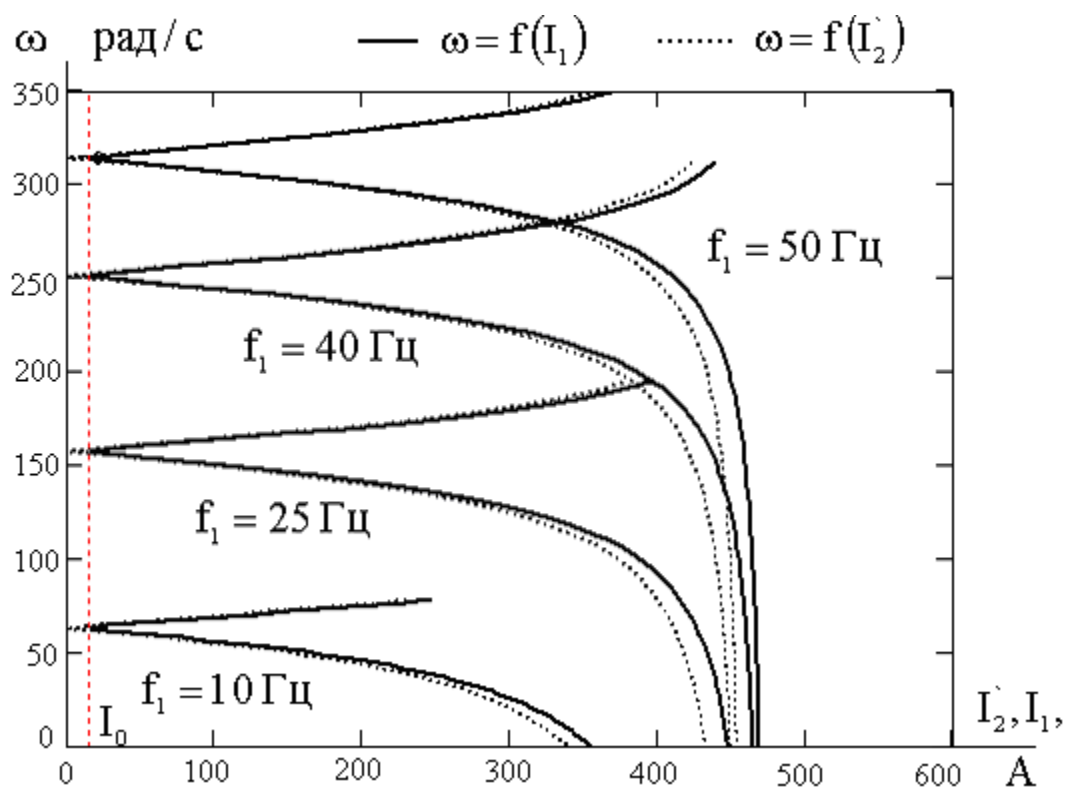


Рисунок 14 – Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi}/f_1 = \text{const}$

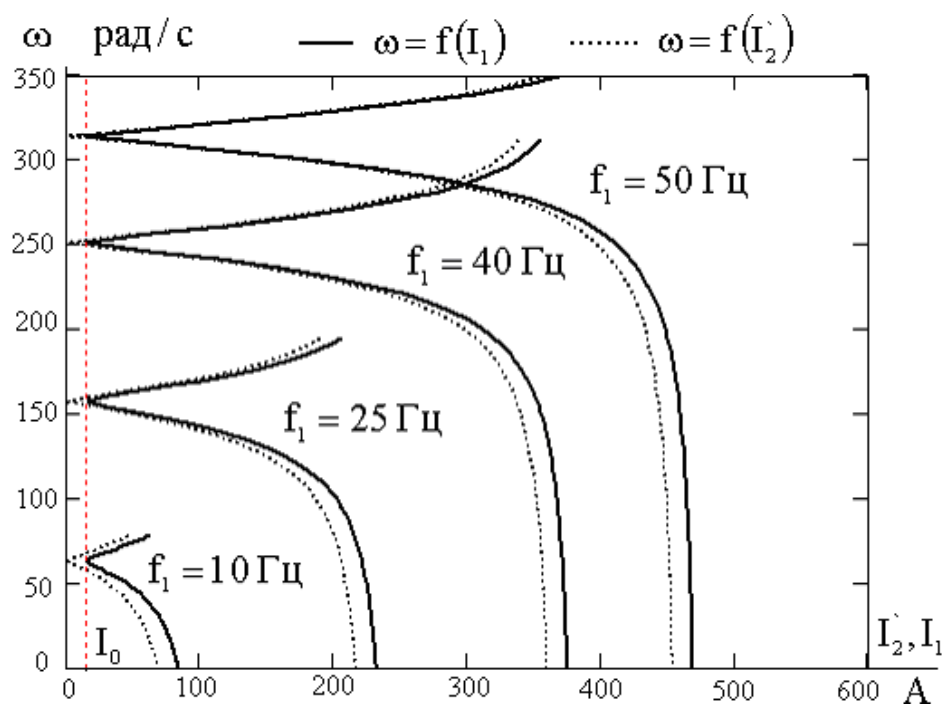


Рисунок 15 – Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi}/f_1^2 = \text{const}$

Для закона управления $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ расчёт электромеханических характеристик тот же, с отличием:

$$U_{1j} = U_{1\phi} \times f_{1*}^2 = 220 \times \{1; 0,8; 0,5; 0,2\}^2 = \{220; 140,8; 55; 8,8\} \text{ В}; \quad (5.7)$$

Электромеханические характеристики для этого закона управления приведены на рисунке 15.

Для построения механических характеристик асинхронной машины при законах управления $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ воспользуемся следующим выражением:

$$M_j(w) = \frac{3 \times (\Gamma_2(w))^2 \times R_2}{w_{0j} \times S_j(w)} = \frac{3 \times (\Gamma_2(w))^2 \times 0,04903}{w_{0j} \times S_j(w)}; \quad (5.8)$$

Расчёт механических характеристик двигателя последовательно является продолжением расчёта электромеханических характеристик. Теперь соответствующие для каждой характеристики значения $\Gamma_2(w)$, $S_j(w)$, w_{0j} подставляются в выражение для характеристики момента. Механические характеристики двигателя при законах управления $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ приведены на рисунках 16 и 17.

Произведём аналитический расчёт величин критических моментов для рассматриваемых законов управления асинхронной машиной по следующему выражению:

$$\begin{aligned} M_{\text{кр}j} &= \frac{3 \times U_{1j}^2}{2 \times w_{0j} \times R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \times f_{1*}^2) \times \left(1 + \frac{R_1}{X_{\text{нн}} \times f_{1*}}\right)}} = \\ &= \frac{3 \times U_{1j}^2}{2 \times w_{0j} \times 0,0397 + \sqrt{(0,0397^2 + 0,48116^2 \times f_{1*}^2) \times \left(1 + \frac{0,0397}{14,024 \times f_{1*}}\right)}}; \end{aligned} \quad (5.9)$$

Для расчёта критического скольжения воспользуемся следующим выражением:

$$S_{\text{крj}} = \frac{R_2}{\sqrt{\frac{R_1^2 + X_{\text{KH}}^2 \omega_{1*}^2}{1 + \frac{R_1}{X_{\text{мH}} \omega_{1*}^2}}}} = \frac{0,04903}{\sqrt{\frac{0,0397^2 + 0,48116^2 \omega_{1*}^2}{1 + \frac{0,0397}{14,024 \omega_{1*}^2}}}} \quad \text{o.e.}; \quad (5.10)$$

Результат расчёта критических моментов и скольжений для разных частот и законов управления сведён в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчёта критического момента и скольжения

$f_{1j}, \text{Гц}$	$S_{\text{крj}}, \text{o.e.}$	$M_{\text{крj}} \text{ Н} \cdot \text{м}$		$M_{\text{крj}} \text{ Н} \cdot \text{м} \text{ с IR компенсацией}$	
		$U_{1\Phi} / f_1 = \text{const}$	$U_{1\Phi} / f_1^2 = \text{const}$	$U_{1\Phi} / f_1 = \text{const}$	$U_{1\Phi} / f_1^2 = \text{const}$
50	0,102	445,119	445,119	549,222	549,222
40	0,128	436,008	279,045	549,619	352,169
25	0,202	409,899	102,475	549,694	138,15
10	0,474	322,775	12,911	545,889	22,336

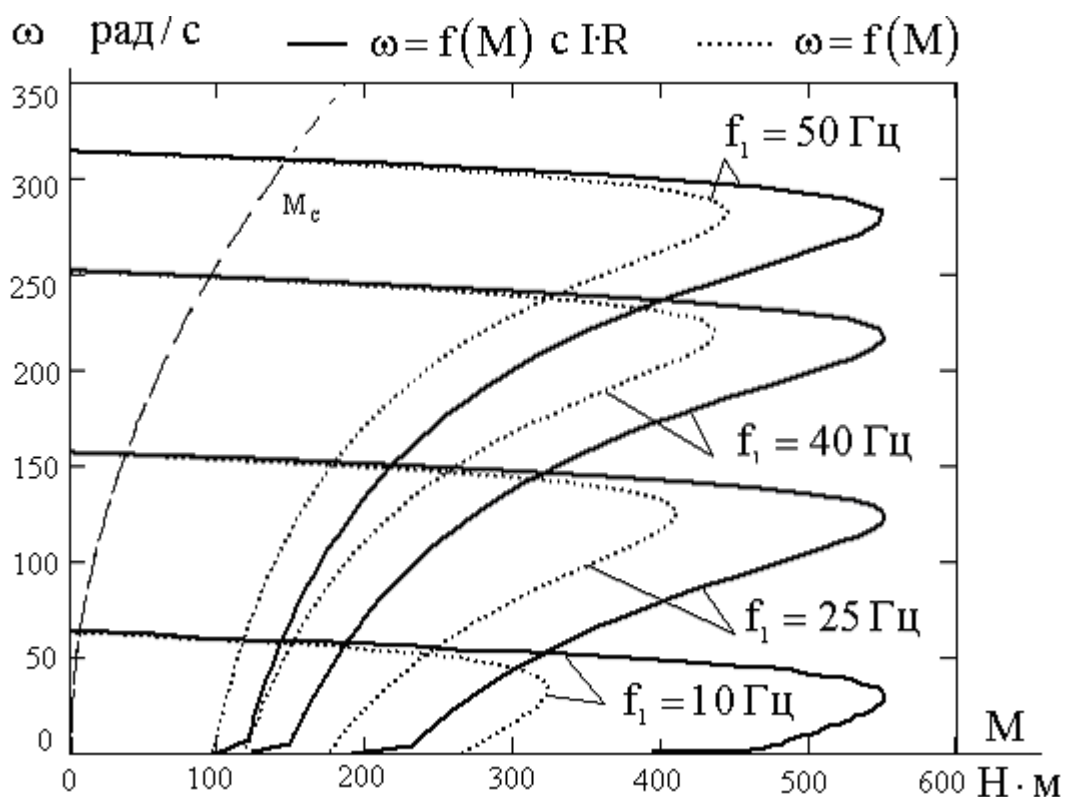


Рисунок 16 – Механические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\Phi} / f_1 = \text{const}$

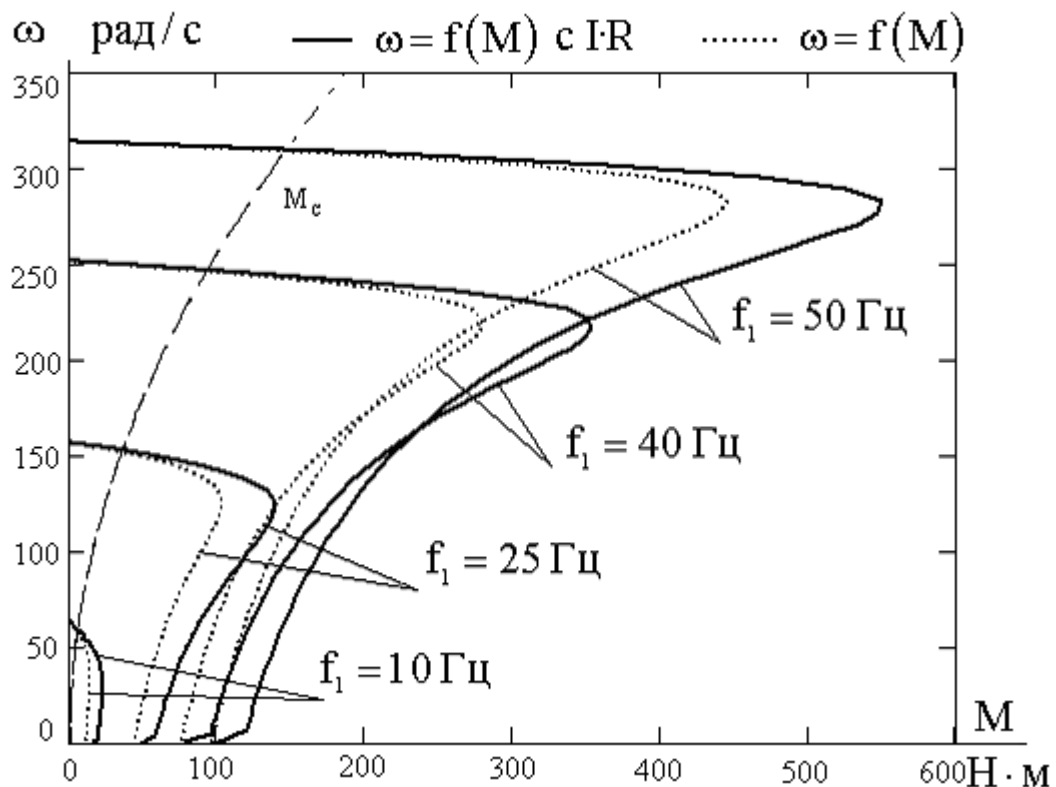


Рисунок 17 – Механические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$

5.2 Регулирование скорости электропривода с помощью законов

$U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ с $I \cdot R$ – компенсацией

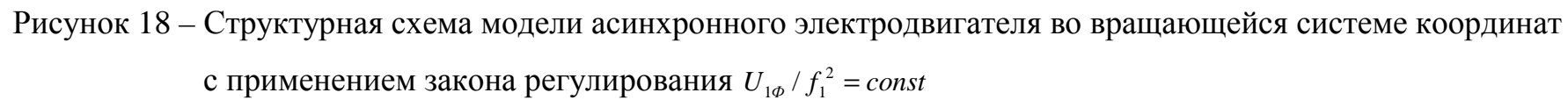
Из построенных характеристик следует, что для данного двигателя при законе управления $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$ с уменьшением частоты питающей сети заметно влияние активного сопротивления обмотки статора. В результате критический момент на малых частотах падает. Для регулирования скорости двигателя с постоянным критическим моментом необходимо изменять напряжение по следующему закону $U_{1j} = U_{1\phi} \times f_{1*} + I_{1i} \times R_1$ (пропорциональное регулирование с $I \times R$ – компенсацией). Чтобы реализовать данную зависимость необходимо организовать положительную обратную связь по току с коэффициентом передачи $R_1 \times K_M$, где величина K_M характеризует степень компенсации падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. При выборе $K_M = 1$ имеем полную компенсацию R_1 .

В общем виде расчёт электромеханических и механических характеристик не отличается от предыдущего. Однако при этом необходимо учесть положительную связь по току и постоянно корректировать величину U_{ij} . Характеристики с $I \times R$ – компенсацией были построены в программной среде Mathcad 2000. Механические характеристики АД при законах регулирования скорости $U_{1\phi}/f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi}/f_1^2 = \text{const}$ с $I \cdot R$ - компенсацией приведены на рисунках 16 и 17.

Из построенных механических и электромеханических характеристик электропривода следует, что введение положительной обратной связи по току увеличивает значение максимального момента механических характеристик, однако одновременно ведёт к дополнительному увеличению напряжения в обмотке статора. Влияние дополнительного подмагничивания системы на малых скоростях двигателя опасно с точки зрения недопустимого теплового режима работы, однако при заданном малом диапазоне регулирования скорости данное замечание не является существенным. В области номинальных частот вращения не заметно значительного повышения жёсткости механических характеристик.

5.3 Структурная схема и имитационная модель асинхронного электродвигателя при законе управления $U_{1\phi}/f_1^2 = \text{const}$

Использование скалярного управления асинхронным двигателем с законом $U_{1\phi}/f_1^2 = \text{const}$ позволяет сформировать механические характеристики таким образом, что при вентиляторной нагрузке момент двигателя будет увеличиваться по мере увеличения момента сопротивления. Структурная схема и имитационная модель для этого случая приведены на рисунках 18 и 19. Протокол параметров имитационной модели приведен в приложении А. В схеме имеется задатчик интенсивности, при помощи которого формируется S-образная характеристика.



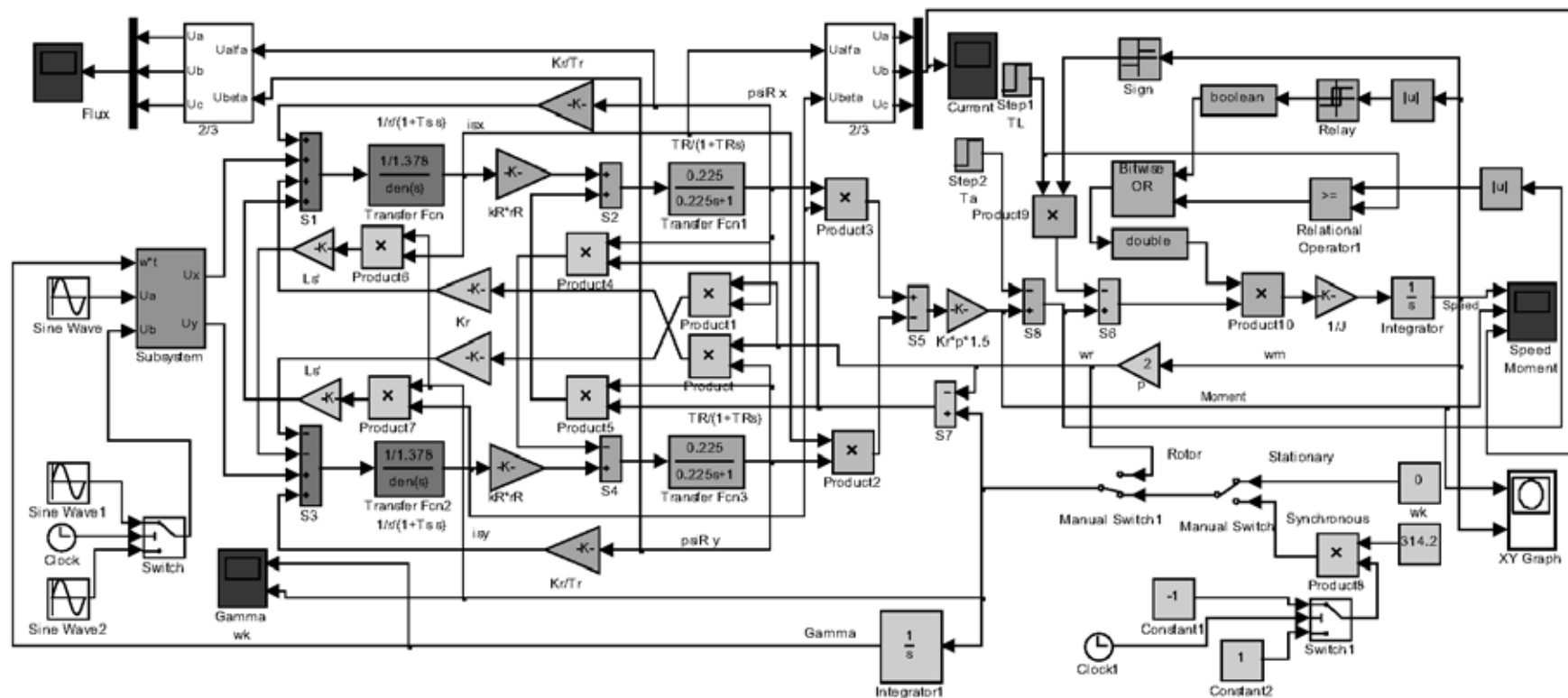


Рисунок 19 – Имитационная модель асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат с применением закона регулирования $U_{10} / f_1^2 = \text{const}$

5.4 Динамические характеристики асинхронного электродвигателя при использовании закона $U_{10} / f_1^2 = \text{const}$

Динамические характеристики асинхронного двигателя строим для различных значений времени задатчика интенсивности (время сглаживания T_v и время разгона T_h).

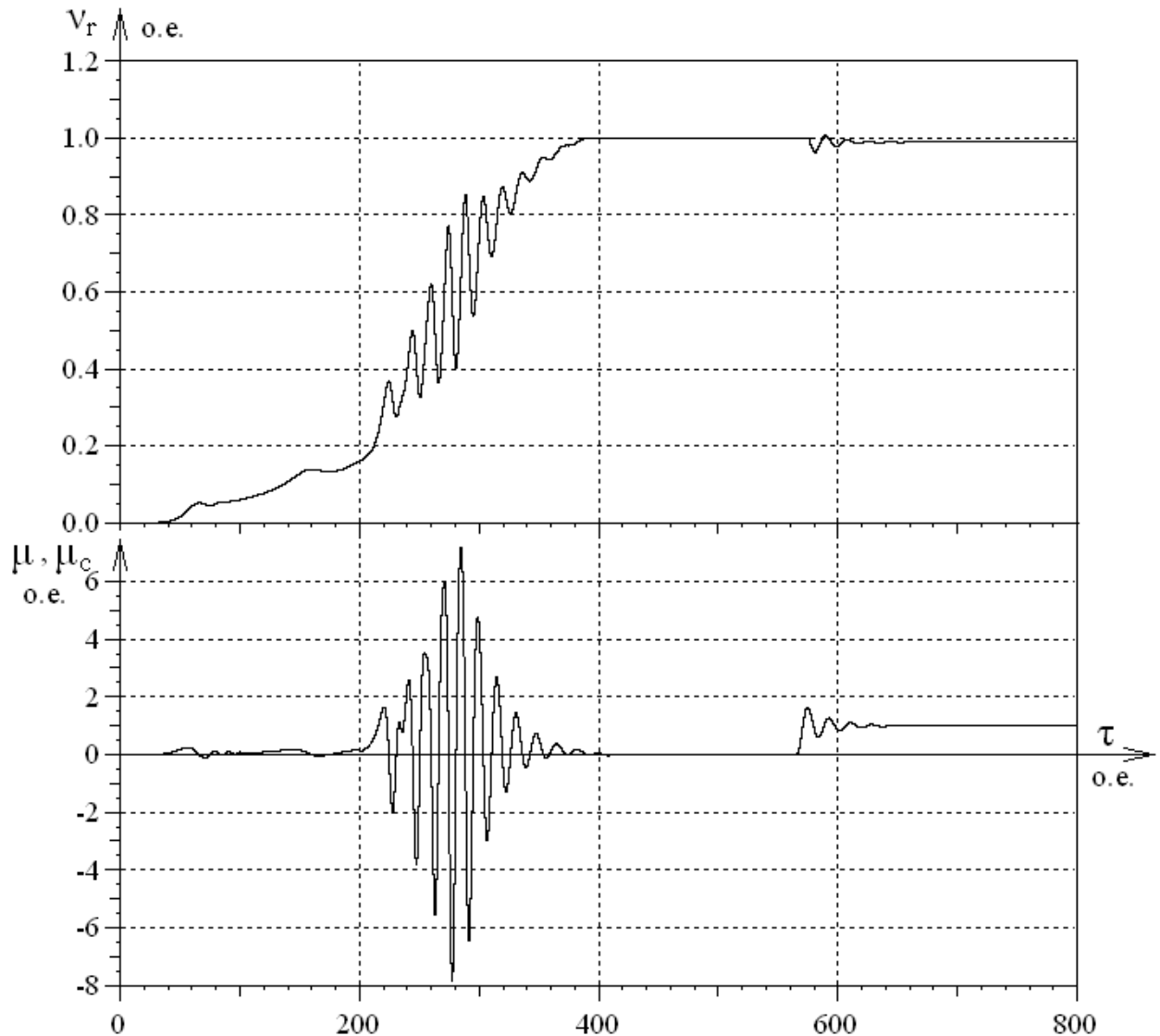


Рисунок 20 – Временные характеристики $n_r = f(t)$, $m = f(t)$, при пуске АД на холостом ходу с набросом нагрузки. $T_v = 100$ о.е., $T_h = 400$ о.е.

Основные показатели качества для характеристики скорости $n_r = f(t)$:
Перерегулирование $s = 0\%$,

Время регулирования $t_D = 360 \times \omega_A = 360 / 314,159 = 1,15$ с,

Установившееся значение $\omega_{уст} = 1 \times \omega_B = 1 \times 314,159 = 314,159$ рад/с,

после наброса нагрузки – $\omega_{уст1} = 0,983 \times \omega_B = 0,983 \times 314,159 = 308,92$ рад/с.

Динамическая механическая характеристика для данного случая приведена на рисунке 21.

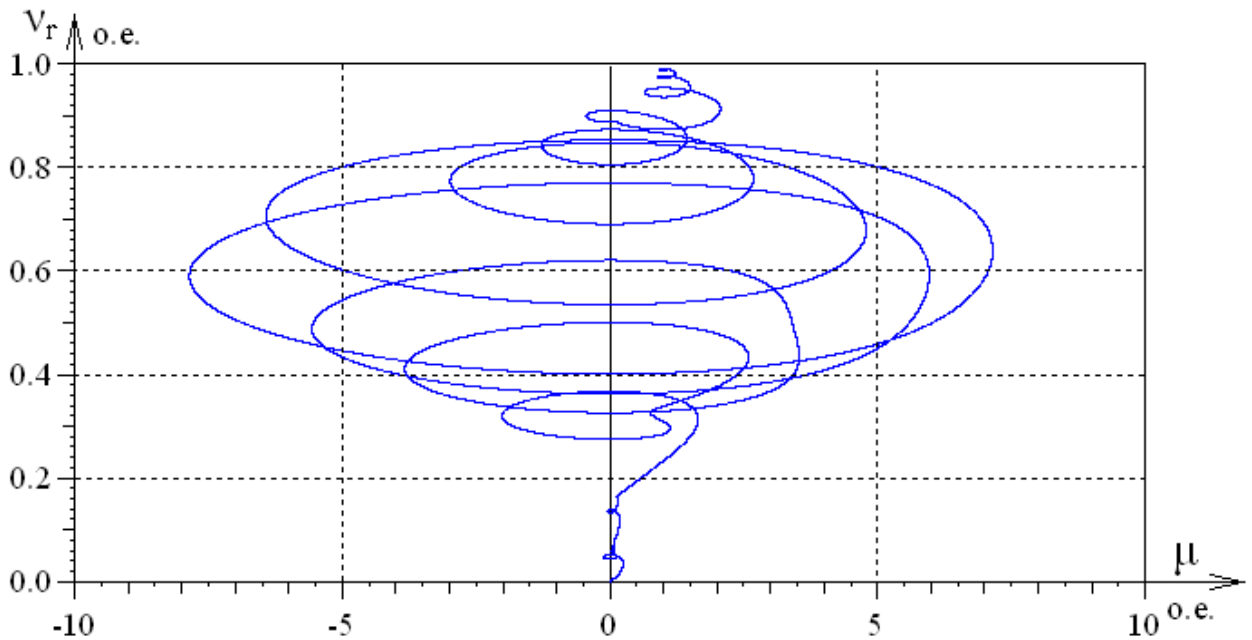


Рисунок 21 – Динамическая механическая характеристика
при $T_v=100$ о.е., $T_h=400$ о.е.

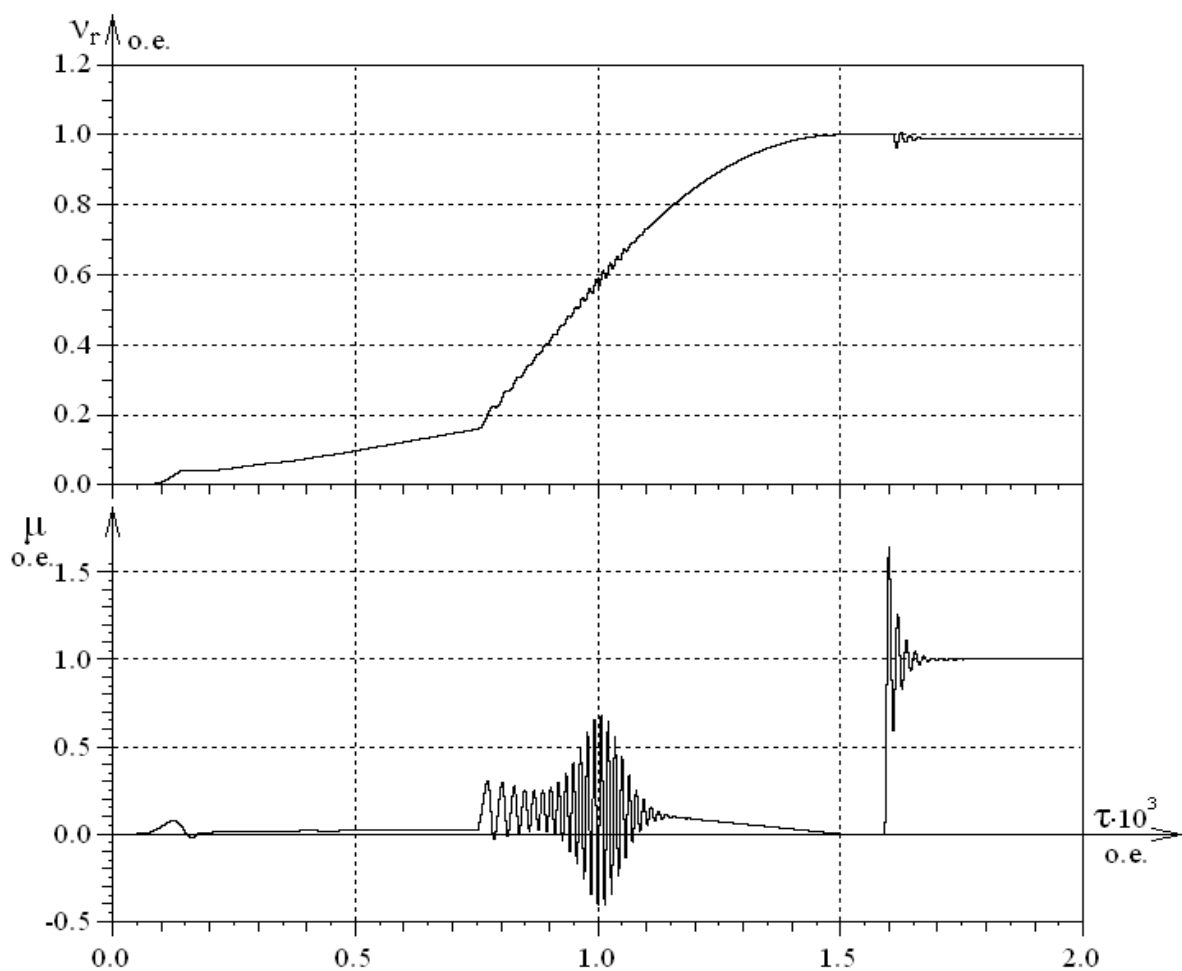


Рисунок 22 – Временные характеристики $n_r = f(t)$, $m = f(t)$, при пуске АД на холостом ходу с набросом нагрузки. $T_v = 500$ о.е., $T_h = 1500$ о.е.

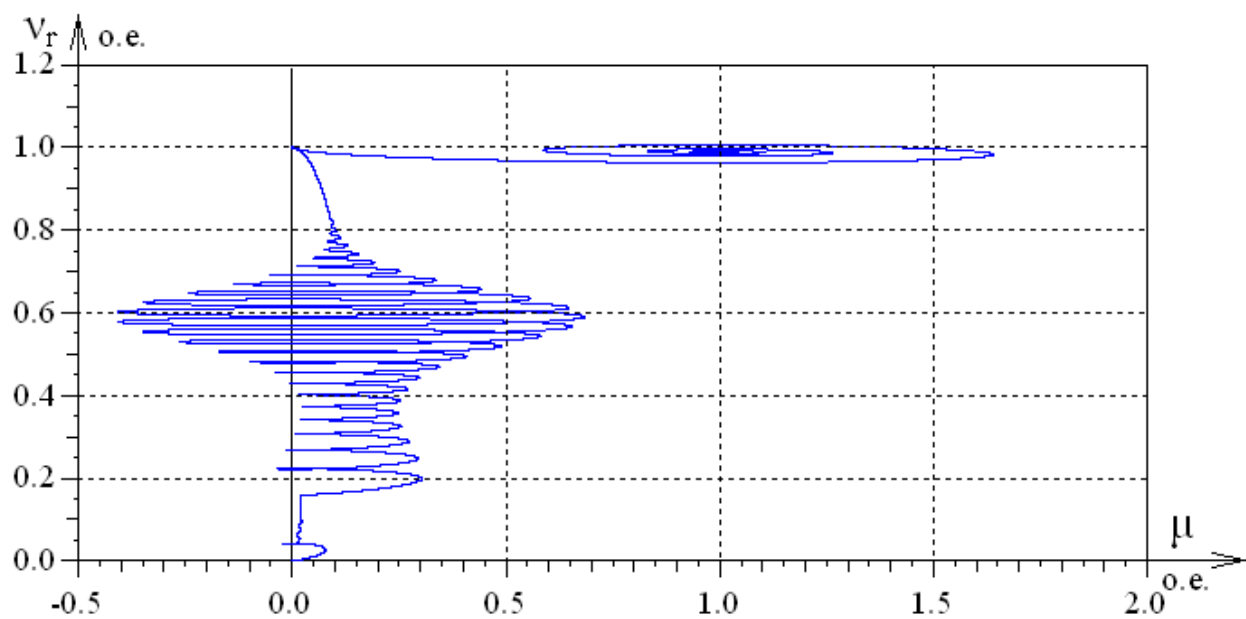


Рисунок 23 – Динамическая механическая характеристика при $T_v = 500$ о.е., $T_h = 1500$ о.е.

Основные показатели качества для характеристики скорости $n_r = f(t)$:

Перерегулирование $s = 0\%$,

Время регулирования $t_D = 87 \times \frac{1}{\omega_A} = 1357 / 314,159 = 4,32 \text{ с}$,

Установившееся значение $\omega_{уст} = 1 \times \omega_B = 1 \times 314,159 = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$,

после наброса нагрузки – $\omega_{уст1} = 0,983 \times \omega_B = 0,983 \times 314,159 = 308,92 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

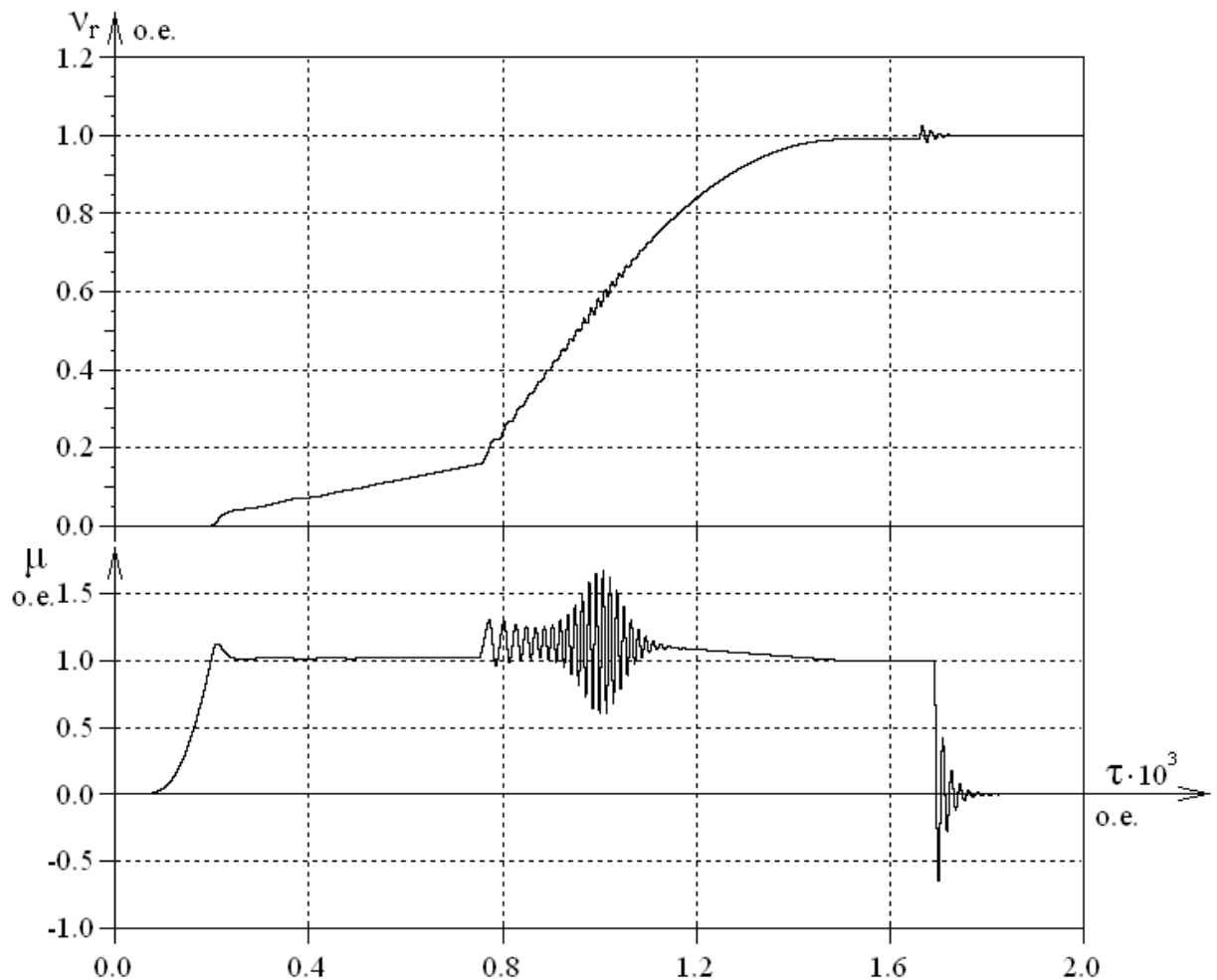


Рисунок 24 – Временные характеристики $n_r = f(t)$, $m = f(t)$, при пуске АД под нагрузкой и сбросом нагрузки. $T_v = 500 \text{ о.е.}$, $T_h = 1500 \text{ о.е.}$

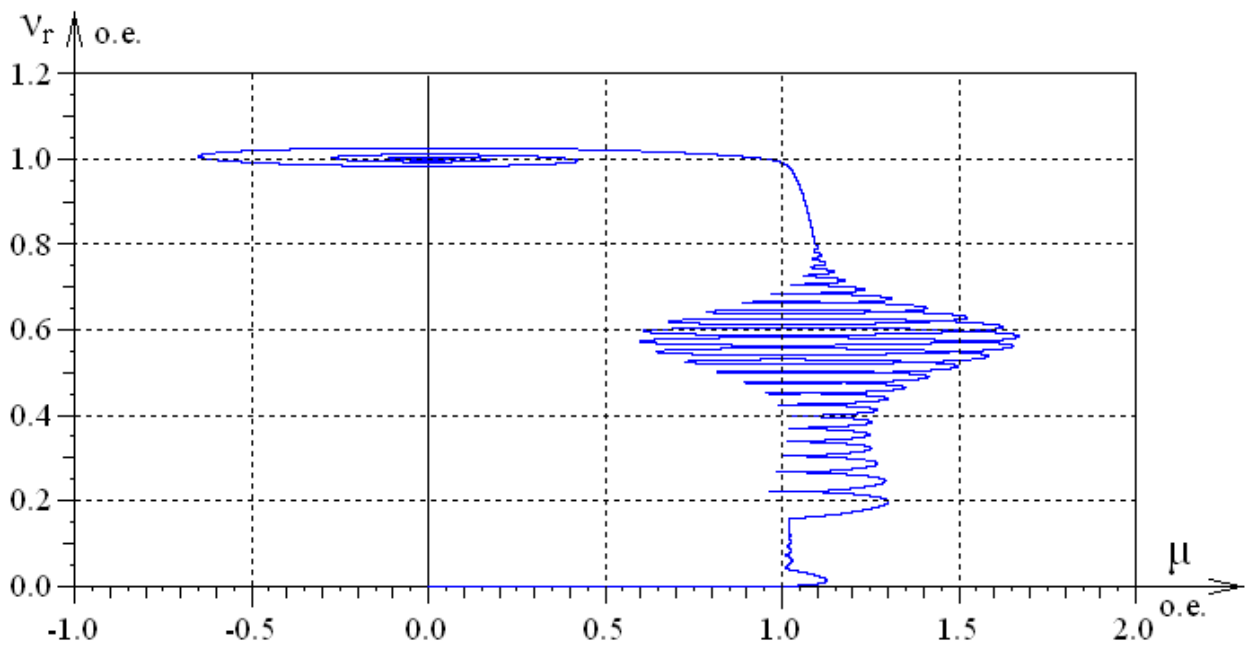


Рисунок 25 – Динамическая механическая характеристика
при $T_v=500$ о.е., $T_h=1500$ о.е.

Основные показатели качества для характеристики скорости $n_r = f(t)$:

Перерегулирование $s = 0\%$,

Время регулирования $t_D = 87 \times \dot{I}_A = 1377 / 314,159 = 4,383$ н,

Установившиеся значение, $w_{уст1} = 0,983 \times w_B = 0,983 \times 314,159 = 308,92 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

после сброса нагрузки – $w_{уст} = 1 \times w_B = 1 \times 314,159 = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

Вид переходных процессов при пуске асинхронного электродвигателя с использованием задатчика интенсивности показывает наличие колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента изменяющейся в пределах $\pm 2 \times \dot{I}_A$ и затухающей по мере разгона двигателя, что примерно в три раза меньше чем при прямом пуске. При достижении динамической характеристикой критического значения, двигатель имеет максимальное ускорение. Пуск под нагрузкой сопровождается меньшим значением перерегулирования скорости. По достижении скоростью заданного значения, момент электродвигателя стремится уравновесить величину нагрузки. Наброс нагрузки приводит к соответствующей просадке скорости. В итоге, использование задатчика интенсивности позволяет получить

удовлетворительные переходных характеристик, однако наличие колебаний в электромагнитном моменте нежелательно для механики электропривода.

6 Векторное частотно-токовое управление РЭП насоса

С целью получения повышенного качества динамических процессов, рассмотрим вариант векторного частотно-токового управления АД с КЗ. Регулировать скорость АД можно, если в качестве управляющего сигнала использовать не напряжение, а ток статора и частоту вращения [4, стр. 49]. В данном режиме ПЧ работает в режиме источника тока. Практическая реализация режима источника тока осуществляется введением релейных элементов, на вход которых подаётся разность управляющего сигнала и сигнала с датчика тока двигателя. При реализации режима источника тока, ток статора является задающим сигналом. Кроме того, на систему управления инвертором можно наложить дополнительные функции. Сориентируем ось x подвижной координатной системы по потокосцеплению ротора. Тогда $\vec{Y}_2 = Y_{2x}$, $Y_{2y} = 0$. Система уравнений запишется в виде:

$$\begin{cases} \dot{I}_{1x} = U_{1x} + x'_1 n_{KC} I_{1y} + \frac{k_2}{T_2} Y_{2x} \\ \dot{I}_{1y} = U_{1y} - x'_1 n_{KC} I_{1x} - k_2 n_r Y_{2x} \\ \frac{(1+T_2 p)}{T_2} Y_{2x} = k_2 r_2 I_{1x} \\ 0 = k_2 r_2 I_{1y} - (n_{KC} - n_r) Y_{2x} \\ H \times p \times n_r = m - m_c \\ m = k_2 (Y_{2x} \times I_{1y}) \end{cases} \quad \hat{U} \quad \begin{cases} \dot{I}_{1x} = U_{1x} + x'_1 n_{KC} I_{1y} + \frac{k_2}{T_2} Y_{2x} \\ \dot{I}_{1y} = U_{1y} - x'_1 n_{KC} I_{1x} - k_2 n_r Y_{2x} \\ \frac{(1+T_2 p)}{T_2 k_2 r_2} Y_{2x} = I_{1x} \\ n_{KC} = n_r + \frac{k_2 r_2 I_{1y}}{Y_{2x}} \\ H \times p \times n_r = m - m_c \\ m = k_2 (Y_{2x} \times I_{1y}) \end{cases}$$

В электроприводах с микропроцессорными системами управления применяются структуры с регуляторами скорости, потока, момента. Структурная схема частотно-токового векторного управления, построенная по преобразованной системе уравнений, приведена на рисунке 26.

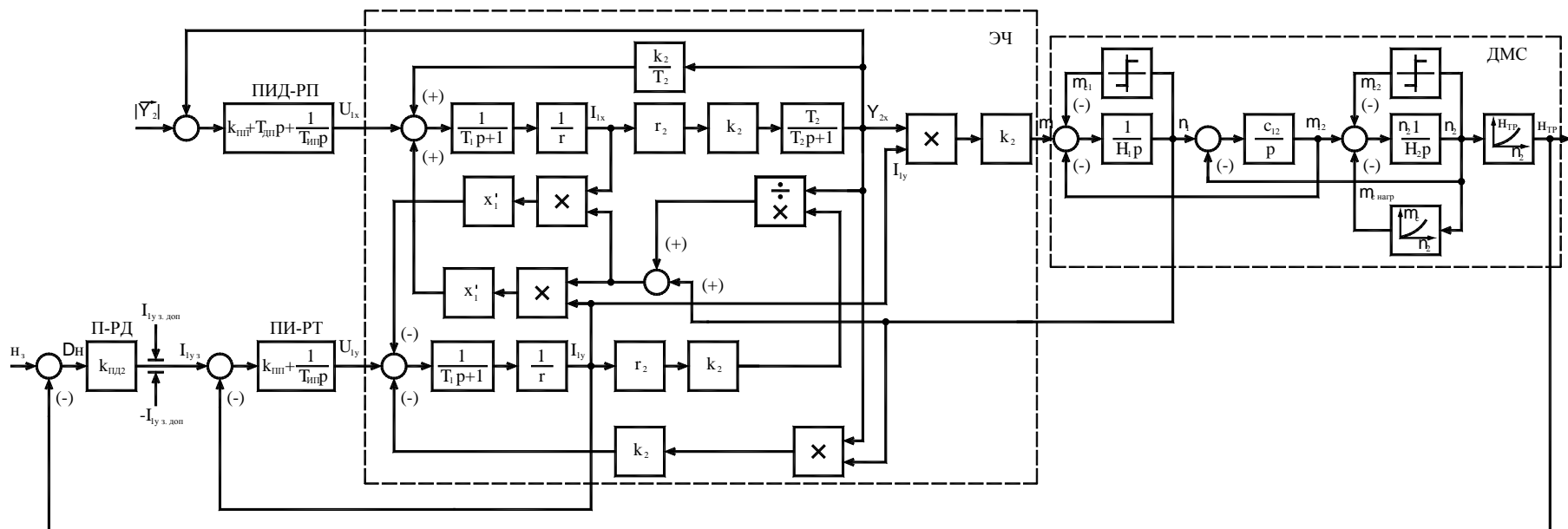


Рисунок 26 – Структурная схема частотно-токового векторного управления с $\left| \vec{Y}_2 \right| = \text{const}$ и прямой ориентацией

по вектору $\left| \vec{Y}_2 \right|$ с регуляторами тока (составляющей тока I_{1y}), потока и давления

6.1 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура потока

Синтез регуляторов при построении подчинённой системы в каждом канале осуществим с утверждением, что постоянная времени в канале управления потоком была, по крайней мере, на порядок меньше постоянной времени в канале управления скоростью. При этом пренебрегается влияние перекрёстных обратных связей [5, стр. 261].

Эквивалентная передаточная функция объекта регулирования контура потока:

$$W_{\text{раз.п.}}(p) = \frac{r_2 k_2 T_2}{r(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) - r_2 k_2^2},$$

Объект регулирования описывается колебательным звеном. Для получения эквивалентной передаточной функции замкнутого контура в виде апериодического звена необходимо получить передаточную функцию разомкнутой структуры вида:

$$W_{\text{раз.жел}}(p) = \frac{1}{T_{\text{оп.}} p},$$

В соответствии с этим запишем выражение для определения передаточной функции регулятора потока.

$$W_{\text{раз.п.}}(p) \times W_{\text{РП}}(p) = W_{\text{раз.жел}}(p) \Rightarrow W_{\text{РП}}(p) = W_{\text{раз.жел}}(p) \times W_{\text{раз.п.}}(p)^{-1},$$

Подставляя значения $W_{\text{раз.п.}}(p)$ и $W_{\text{раз.жел}}(p)$ получим:

$$W_{\text{РП}}(p) = \frac{r(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) - r_2 k_2^2}{r_2 k_2 T_2} \times \frac{1}{T_{\text{оп.}} p},$$

По виду передаточной функции исходного объекта регулирования можно сделать вывод о том, что структура регулятора должна быть пропорционально-интегрально-дифференциальная (ПИД) с передаточной функцией:

$$W_{\text{РП}}(p) = T_d p + \frac{1}{T_i p} + K_P,$$

где $T_{дп}$, $T_{ип}$, – соответственно дифференциальная и интегральная постоянные времени регулятора потока, $K_{пп}$ – коэффициент усиления регулятора. Осуществим выбор постоянной времени $T_{оп.} = 1$ о.е.

$$W_{пп}(p) = T_{дп}p + \frac{1}{T_{ип}p} + K_{пп} = \frac{T_1 r}{T_{оп.} r_2 k_2} p + \frac{1}{\frac{T_{оп.} T_2 r_2 k_2}{r - r_2 k_2^2} p} + \frac{(T_1 + T_2) r}{T_{оп.} T_2 r_2 k_2},$$

где параметры регулятора:

$$T_{дп} = \frac{T_1 r}{T_{оп.} r_2 k_2} = \frac{5,445 \times 0,03319}{1 \times 0,01815 \times 0,979} = 9,833 \text{ о.е.},$$

$$T_{ип} = \frac{T_{оп.} T_2 r_2 k_2}{r - r_2 k_2^2} = \frac{1 \times 270,947 \times 0,01815 \times 0,979}{0,03319 - 0,01815 \times 0,979^2} = 327,689 \text{ о.е.},$$

$$K_{пп} = \frac{(T_1 + T_2) r}{T_{оп.} T_2 r_2 k_2} = \frac{(5,445 + 270,947) \times 0,03319}{1 \times 270,947 \times 0,01815 \times 0,979} = 1,842 \text{ о.е.}$$

6.2 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура тока

Исходная передаточная функция объекта регулирования разомкнутого контура тока:

$$W_{раз.т.}(p) = \frac{1}{r(T_1 p + 1)},$$

В соответствии с оптимизацией контура потока приведём передаточную функцию объекта регулирования к интегральному звену путём включения пропорционально-интегрального регулятора. При этом постоянная времени контура $T_{от.} = 10 \times T_{оп.} = 10$ о.е.

$$W_{пт}(p) = W_{раз.жел.т.}(p) \times W_{раз.т.}(p)^{-1} = K_{пт} + \frac{1}{T_{ит} p},$$

$$W_{пт}(p) = \frac{r(T_1 p + 1)}{T_{от.} p} = \frac{r T_1}{T_{от.}} + \frac{1}{\frac{T_{от.}}{r} p},$$

где $T_{ит}$, – интегральная постоянная времени регулятора тока, $K_{пт}$ – коэффициент усиления регулятора.

$$T_{\text{ип}} = \frac{T_{0\text{т.}}}{r} = \frac{10}{0,03319} = 301,266 \text{ о.е.},$$

$$K_{\text{пт}} = \frac{T_{\text{л}} r}{T_{0\text{т.}}} = \frac{0,03319 \times 5,445}{10} = 0,0181 \text{ о.е.}$$

6.3 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура давления

Для оптимизации контура давления примем передаточную функцию замкнутого контура тока в соответствии с проведённой настройкой:

$$W_{\text{зам.т.}}(p) = \frac{1}{T_{0\text{т.}} p + 1},$$

Контур содержит нелинейность вида: $n_{\text{тр}} = \frac{H}{n_r^2} \times n_2^2 = \frac{1}{0,983^2} \times n_2^2 \text{ о.е.}$

проведём линеаризацию характеристики для настройки контура:

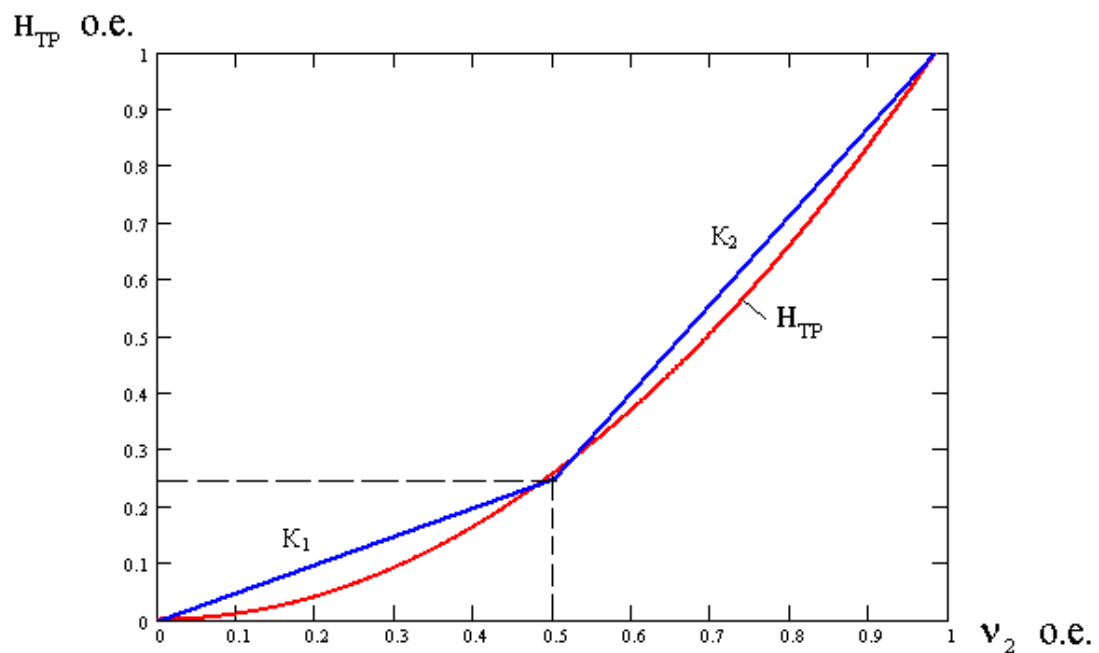


Рисунок 27 - Линеаризация характеристики $n_{\text{тр}} = \frac{H}{n_r^2} \times n_2^2 = \frac{1}{0,983^2} \times n_2^2 \text{ о.е.}$

Тогда характеристика давления запишется в виде:

$$n_{\text{тр}} = \frac{H}{n_r^2} \times \frac{K_1}{K_2} \times n_2 = \frac{1}{0,983^2} \times \frac{0,5}{1,552} \times n_2 \text{ о.е.}$$

$$W_{\text{раз.д.}}(p) = W_{\text{зам.т.}}(p) \times k_2 \times \frac{H}{n_r^2} \times \frac{1}{H_{sp}} \times \frac{eK_1}{eK_2} \dot{u} = \frac{k_2}{T_{0т.п} + 1} \times \frac{1}{H_{sp}} \times \frac{H}{n_r^2} \times \frac{eK_1}{eK_2} \dot{u},$$

Т.к. контур тока является внутренним по отношению к контуру скорости, то постоянная времени последнего будет равна $T_{0с.} = 2 \times T_{0т.} = 20$ о.е.

Передаточная функция регулятора давления:

$$W_{\text{рД}}(p) = W_{\text{зам.жел.д.}}(p) \times W_{\text{раз.д.}}(p)^{-1} = K_{\text{пД}},$$

$$W_{\text{рД1}}(p) = W_{\text{зам.жел.д.}}(p) \times W_{\text{раз.д.}}(p)^{-1} = \frac{H_s}{T_{0с.}} \times \frac{T_{0т.п} p + 1}{k_2} \times \frac{n_r^2}{H \times K_1},$$

$$W_{\text{рД2}}(p) = W_{\text{зам.жел.д.}}(p) \times W_{\text{раз.д.}}(p)^{-1} = \frac{H_s}{T_{0с.}} \times \frac{T_{0т.п} p + 1}{k_2} \times \frac{n_r^2}{H \times K_2},$$

где $K_{\text{пД}}$ – коэффициент усиления регулятора давления.

$$K_{\text{пД1}} = \frac{H_s}{T_{0с.}} \times \frac{n_r^2}{H \times K_1} = \frac{557,8 \times 0,983^2}{20 \times 0,979 \times 1 \times 0,5} = 55,056 \text{ о.е.},$$

$$K_{\text{пД2}} = \frac{H_s}{T_{0с.}} \times \frac{n_r^2}{H \times K_2} = \frac{557,8 \times 0,983^2}{20 \times 0,979 \times 1 \times 1,552} = 17,737 \text{ о.е.}$$

Характеристика регулятора давления приведена на рисунке 28.

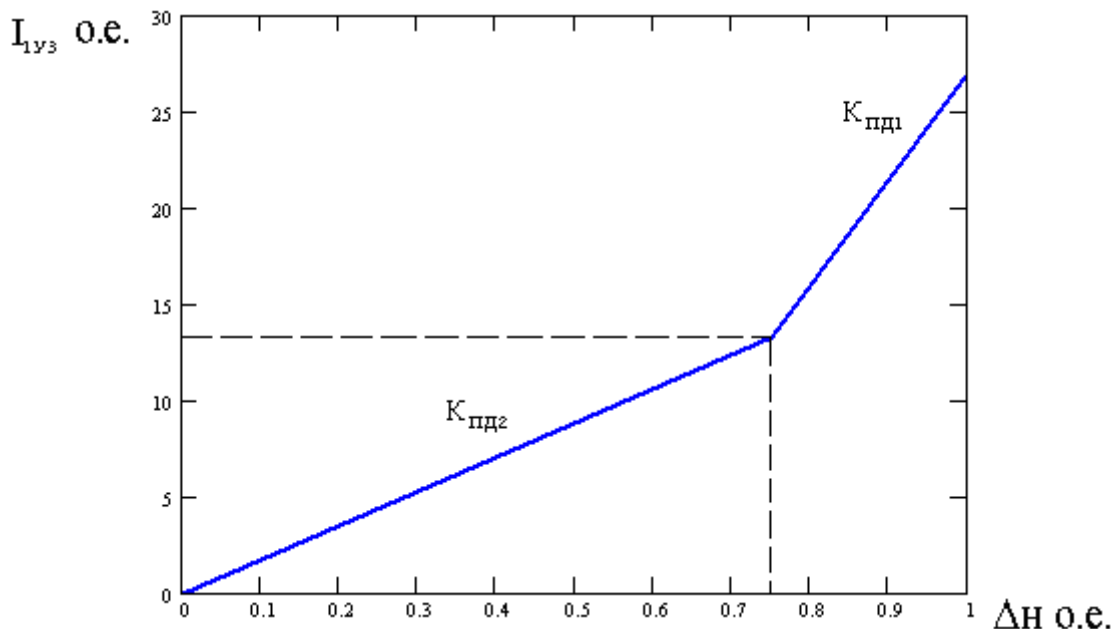


Рисунок 28 – Характеристика регулятора давления РЭП насоса

6.4 Имитационная модель векторного частотно-токового управления РЭП насоса

Моделирование асинхронного электродвигателя и электропривода, осуществляется с помощью системы визуального моделирования SIMULINK, входящей в универсальный программный пакет MATLAB [5].

Основное достоинство пакета MATLAB является то, что для работы пользователю достаточно узнать о нем ровно столько, сколько требует решаемая задача. Если же решаемая задача требует создание каких-либо специальных инструментов, MATLAB предоставляет в распоряжение пользователя практический универсальный язык объектно-ориентированного программирования в сочетании с различными средствами отладки создаваемых программ. Структура данного пакета позволяет сочетать основные подходы к созданию модели: аналитический и имитационный. Как следует из названия пакета, он ориентирован в первую очередь на обработку массивов данных (матриц и векторов), что позволяет повысить эффективность процедур, работающих с указанными типами данных, по сравнению с языками программирования «общего назначения» (Pascal; C++). С точки зрения пользователя, MATLAB представляет собой богатую библиотеку функций (в MATLAB 5.3 их около 800). Для облегчения поиска библиотека функций разбита на разделы. Те из них, которые носят общий характер, входят в состав ядра данного пакета. Другие функции, относящиеся к конкретной области, включены в состав специальных разделов. В данный пакет входят как стандартные средства: решение дифференциальных и алгебраических уравнений, так и нетрадиционные, способные претендовать на определенную уникальность в своем роде: средства цифровой обработки изображений, поиск решений на основе нечеткой логики и т.д. Основное место среди наборов инструментов занимает система визуального моделирования SIMULINK. В качестве элементов для построения моделей по средствам SIMULINK используются модули, находящиеся в соответствующей библиотеке. Библиотека SIMULINK с одной стороны, обеспечивает пользователю доступ

ко всем основным возможностям пакета MATLAB, а с другой является достаточно самостоятельной его компонентой. Блоки, включаемые в создаваемую модель, могут быть связаны друг с другом, как по информации, так и по управлению. Тип связи зависит от типа блока и логики работы моделей. Данные, которыми обмениваются блоки, могут быть скалярными величинами, векторами, или матрицами произвольной размерности. Любая модель может иметь иерархическую структуру, т.е. состоять из более низкого уровня, причем число уровней иерархии практически не ограничено. Наряду с другими параметрами моделирования пользователь может задавать способ изменения модельного времени, - с постоянным или переменным шагом, а также условие окончания моделирования. В ходе моделирования имеется возможность наблюдать за процессами, происходящими в системе. Для этого используется специальные «смотровые окна». Характеристики системы могут быть представлены как в числовой, так и в графической форме. Существует возможность включения в состав средств анимации.

Еще одно достоинство библиотеки SIMULINK заключается в том, что она является открытой системой: состав библиотеки может быть пополнен за счет разработки собственных блоков. Библиотека блоков SIMULINK представляет набор визуальных объектов, используя которые можно собирать, как из кубиков, произвольную конструкцию. Практически для всех блоков существует возможность индивидуальной настройки: можно изменить как внутренние параметры блоков), так и внешнее оформление. На порядок соединения блоков не накладывается никаких ограничений, но необходимо соблюдать ряд правил, обусловленных в основном логикой работы самой модели, а не специальными требованиями SIMULINK.

Для построения модели векторного частотно-токового управления РЭП насоса воспользуемся преобразованной системой уравнений. При этом в систему включена ДМС. Структура векторного управления использует информацию с датчиков тока и давления. Ограничение выхода регулятора давления определяют ограничение тока в системе на уровне $\pm 1,5 I_{ly}$. При этом

ограничении регулятор давления всегда работает с коэффициентом передачи $K_{ПД2} = 17,737$ о.е. При отсутствии ограничения в момент пуска характеристика тока более чем в пять раз превышает базовое значение. Схема имитационной модели векторного частотно-токового управления приведена на рисунке 29.

На данной модели проведены следующие исследования. Пуск системы РЭП насоса с открытым клапаном. После окончания процесса разгона сигнал останова двигателя в точке $t_{ост} = 2500$ о.е. рисунок 30. Как и в системе скалярного управления рассмотрен случай сброса нагрузки до значения $m_{\xi} = 0,5 \times m_{\xi.ном}$ с последующим набросом до $m_{\xi} = 1,5 \times m_{\xi.ном}$, рисунок 31.

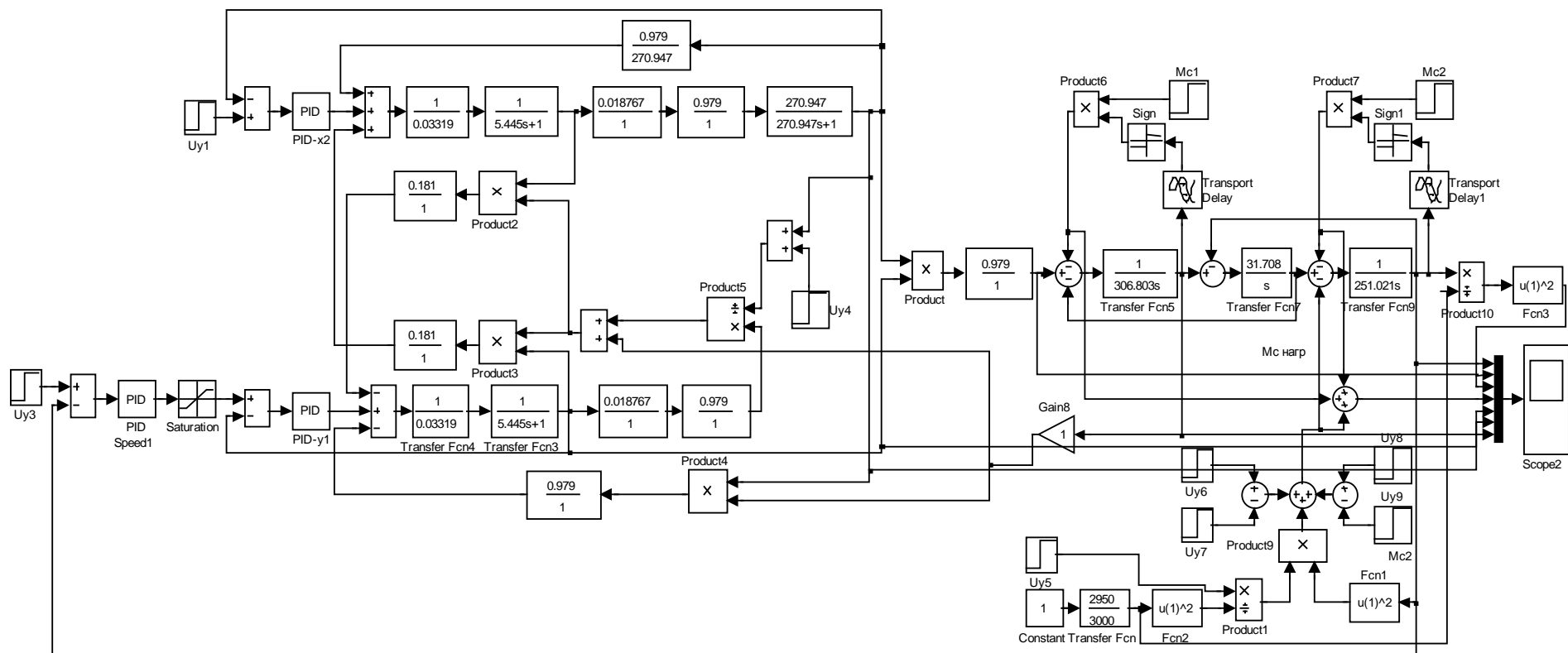


Рисунок 29 – Имитационная модель векторного частотно-токового управления РЭП насоса в программе MATLAB

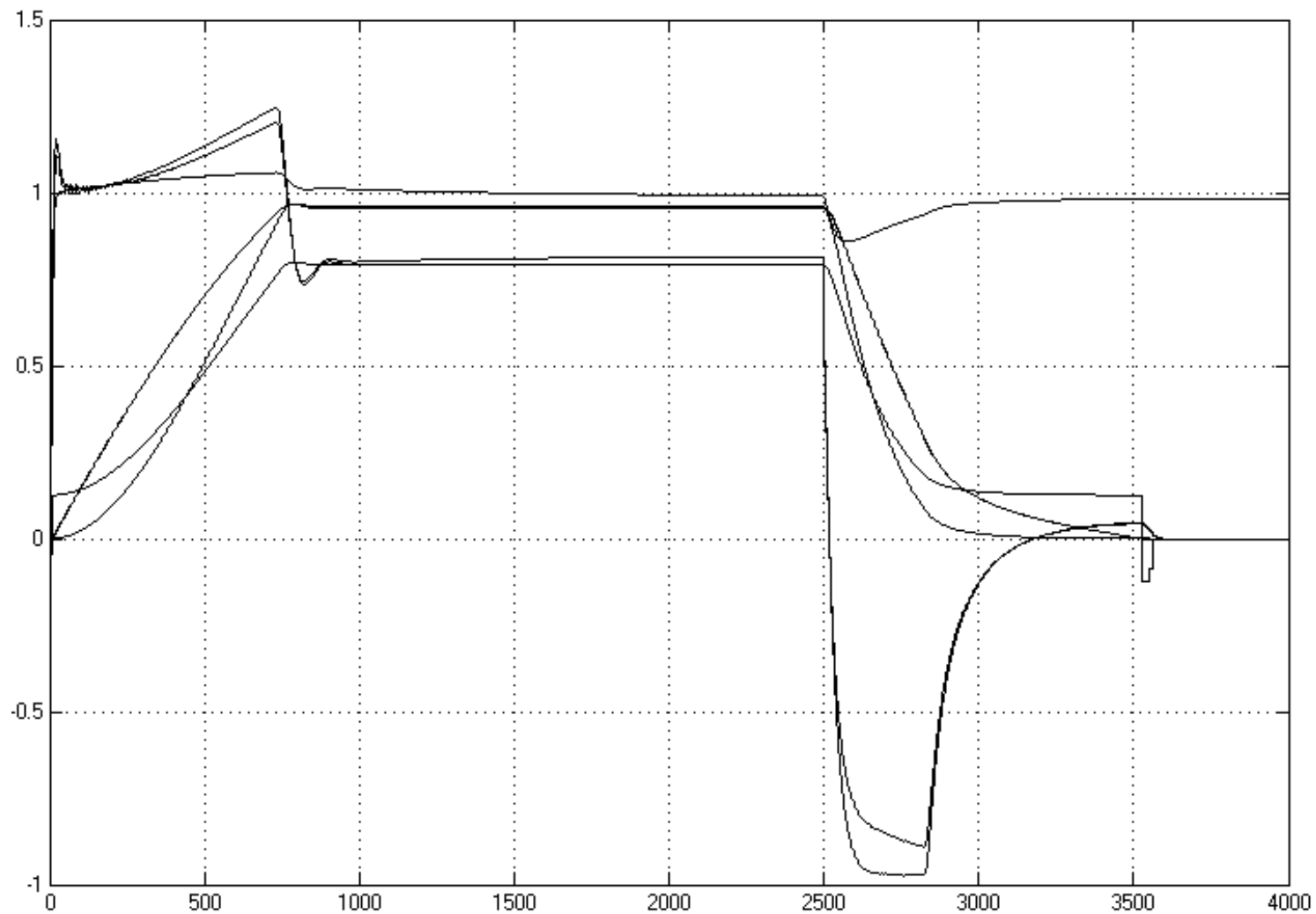


Рисунок 30 – Динамические характеристики $n_1, n_2 = f(t)$; $m, m_c = f(t)$; $I_1 = f(t)$; $n_{TP} = f(t)$; $Y_1 = f(t)$ векторного частотно-токового управления, пуск, останов

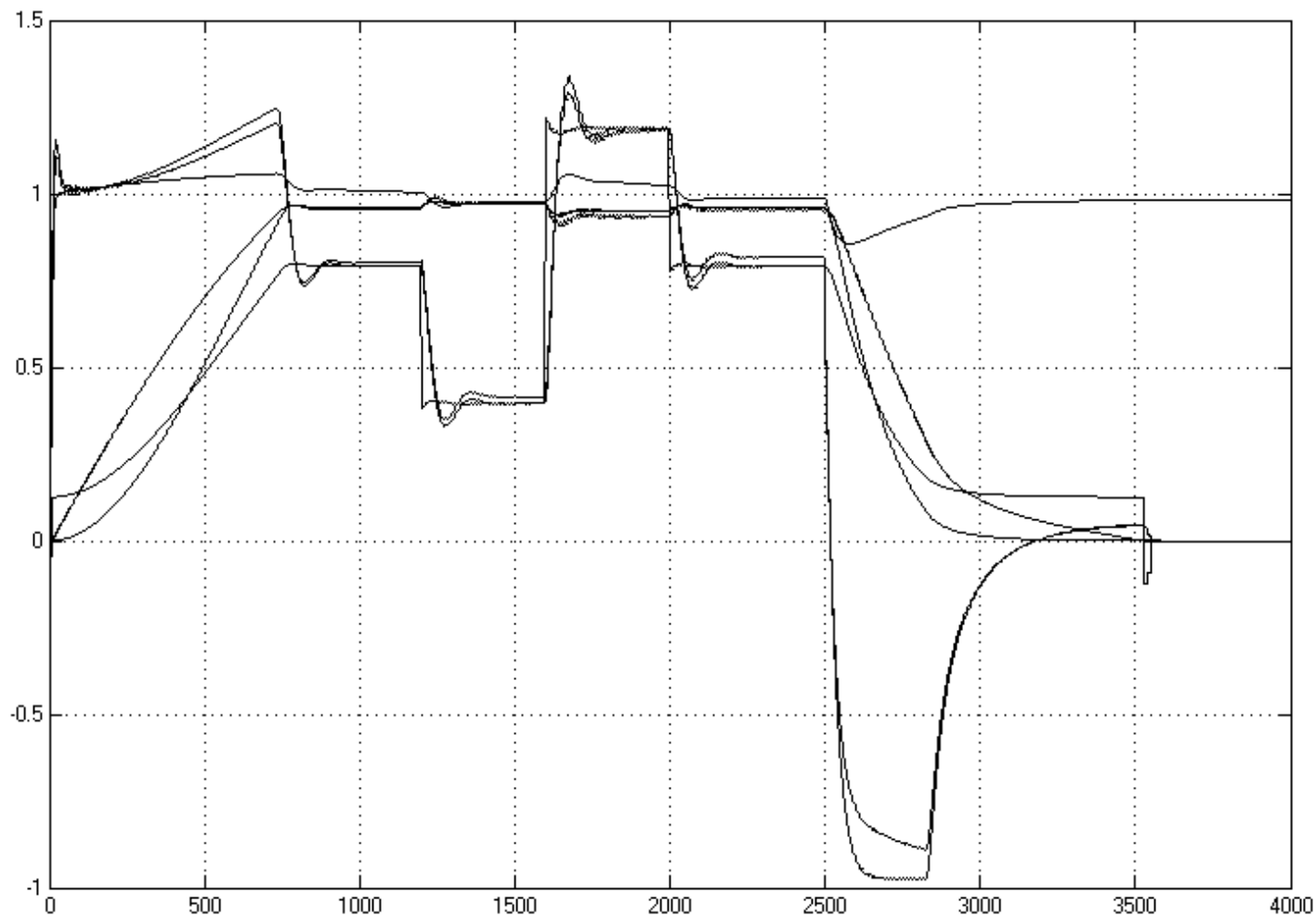


Рисунок 31 – Динамические характеристики $n_1, n_2 = f(t)$; $m m_c = f(t)$; $I_1 = f(t)$; $n_{TP} = f(t)$; $Y_1 = f(t)$ векторного частотно-токового управления; пуск, сброс нагрузки до $m_c = 0,5 \times m_{c,ном}$ и наброс до $m_c = 1,5 \times m_{c,ном}$; останов

6.5 Динамические характеристики системы векторного частотно-токового управления

Значения момента на всём протяжении разгона и торможения не превышают $\pm 1,25 \times M_b$. Скорость и требуемый напор достигают установившегося значения при $t_{п/п} \gg 740$ о.е., что соответствует времени разгона $t_{п/п} = t_{п/п} \times \kappa_b = \frac{740}{314,159} \gg 2,356$ с. Характеристики скорости и давления достигают установившегося значения со значением перерегулирования не превышающего сотую часть базового значения. Сброс и наброс нагрузки приводят к изменению давления в пределах $n_{тр\ уст} \pm 0,01 - 0,03$ о.е., что соизмеримо с точностью датчика давления. Влияния упругих колебаний ДМС при данной настройке системы не наблюдается.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4А1	Гордеев Евгений Борисович

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость затрат технического проекта (ТП): материально-технических, энергетических, финансовых и информационных	"Положению об оплате труда ТПУ". Приказ 25.05.2016 №5994
2. Продолжительность выполнения ТП	Приблизительная оценка продолжительности выполнения технического проекта определяется исходя из ожидаемой трудоёмкости работ.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
Оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта с позиции ресурсоэффективности	Потенциал и перспективность реализации ТП оценивается проведением SWOT –анализа, оценить технический проект выявляя при этом сильные и слабые стороны, а так же возможности и угрозы
Планирование и формирование графика работ по реализации технического проекта	Составление графика по проектированию асинхронного электропривода магистрального насоса теплосети Определить трудоемкость работ для каждого исполнителя. По полученным данным построить диаграмму Ганта, которая, позволяет спланировать процесс реализации технического проекта
Формирование сметы технического проекта	В процессе формирования сметы технического проекта используется следующая группировка затрат по статьям: материальные затраты; полная заработная плата исполнителей; отчисления во внебюджетные фонды; накладные расходы
Ресурсоэффективность технического проекта	Оценка эффективности проекта производится с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику 04.03.2019	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4А1	Гордеев Евгений Борисович		

7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела выпускной квалификационной работы является подтверждение целесообразности разработки технического проекта, отвечающего всем нынешним требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка технического проекта при помощи SWOT-анализа;
- планирование проектно-конструкторских работ;
- расчет затрат на проектные работы электропривода насоса;
- определение ресурсной эффективности проекта.

7.1 SWOT-анализ работы асинхронного электропривода магистрального насоса теплосети.

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента. Представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [19].

Применительно к проекту по разработке электропривода магистрального насоса теплосети, SWOT-анализ позволит оценить положительные и отрицательные стороны проекта.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, которая помогает выявить соответствия слабых и сильных сторон проекта, а также их возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT-анализа стоит использовать следующие обозначения: **С** – сильные стороны проекта; **Сл** – слабые стороны проекта; **В** – возможности; **У** – угрозы.

Матрица SWOT приведена в таблице 5

Таблица 5- Матрица SWOT-анализа технического проекта

	Сильные стороны проекта: С1. Высокое качество питающего напряжения С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации С3. Квалифицированный персонал С4. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования	Слабые стороны проекта: Сл1. Повышенный уровень шума Сл2. Значительная стоимость оборудования
Возможности: В1. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя.	B1 C1 C2 C3	B1 Сл2 Сл3;
В2. Повышение износостойкости элементов деталей электропривода	B2 C2 C3 C4	B2 Сл1 Сл2
В3. Резервное питание электропривода насоса	B3 C1 C2 C3 C4	B3 Сл2 Сл3.
В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.	B4 C1 C4	
Угрозы: У1. Развитая конкуренция технологии производства У2. Риск несвоевременной поставки оборудования У3. Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции	У1 C4 У2 C4 У3 C3	У1 Сл3 У3 Сл2

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения: «+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие.

Анализ интерактивных матриц, приведен в таблицах 6 и 7.

Таблица 6– Интерактивная матрица возможностей

	Сильные стороны проекта			
	С1. Высокое качество питающего напряжения	С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации	С3. Квалифицир ованный персонал	С4. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования
Возможности				
В1. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя.	+	+	+	-
В2. Повышение износостойкости элементов деталей электропривода	-	+	+	+
В3. Резервное питание электропривода магистрального насоса	+	+	+	+
В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.	+	-	-	+

Таблица 7 – Интерактивная матрица угроз

Возможности	Сильные стороны проекта			
	Сл1. Повышенный уровень шума		Сл3.Значительная стоимость оборудования	
В1. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя.	-		+	
В2. Повышение износостойкости элементов деталей электропривода	+		-	
В3.Резервное питание электропривода магистрального насоса	-		+	
В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.	-		-	
Угроза	Сильные стороны проекта			
	С1. Высокое качество питающего напряжения	С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации	С4. Квалифицированный персонал	С5. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования
У1 Развитая конкуренция технологии производства	-	-	-	+
У2. Риск несвоевременной поставки	-	-	-	+
Угроза	Сильные стороны проекта			
	Сл1.Повышенный уровень шума		Сл2.Значительная стоимость оборудования	
У1 Развитая конкуренция технологии производства	-		+	
У2. Риск несвоевременной поставки оборудования	-		-	
У3 Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции оборудования	-		-	
У3 Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции	-	-	+	-

По результатам интерактивных матриц, приведенных в ниже, видно, что самой сильной стороной проекта является надежность защит и аварийной сигнализации, так как несвоевременное ликвидация ошибок и аварий может повлечь за собой опасность для жизни людей, а также нарушение технологического процесса. Кроме того, большая экономия потребляемой электрической энергии и высокое качество питающего напряжения показывают перспективность проекта в целом. Угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

7.2 Планирование технического проекта

Организация работ технического проекта осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического проектирования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- разработка графика проведения технического проектирования.

7.2.1 Определение структуры работ в рамках технического проектирования

В данном разделе, представлен весь перечень этапов и работ, а также дано краткое описание работ, выполненных в ходе технического проектирования:

№1 – разработка технического задания (ТЗ) – представляет собой изучение первичной информации об объекте, требования к техническому проекту, составление задания и плана на работу;

№2 – сбор и изучение литературы – ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, в том числе области применения оборудования, касающихся различных сторон технического проекта;

№3 – сбор исходных данных – это выбор из изученных источников электрических схем соединения; параметров двигателя; параметров частотного преобразователя.

№4 – подготовка данных для ввода в базу комплекса – составление схем замещения, расчет естественных характеристик электродвигателя, расчет параметров схемы замещения;

№5 – отладка базы данных и проведение тестовых расчетов – перепроверка всех введенных значений, формул и схем;

№6 – выбор оборудования – необходимо произвести выбор оборудования из изученных ранее источников. Данная работа формируется из приводного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, частотного преобразователя и определения типа магистрального насоса;

№7 – расчёт и проверка модели АД – построение естественных механических и электромеханических характеристик в среде MATLAB при холостом пуске и пуске с нагрузкой;

№8 – расчёт и проверка модели АД-ПЧ – расчет статических характеристик системы преобразователь-двигатель, расчет и построение механических $M(\omega)$ электромеханических $M_e(\omega)$ характеристик асинхронного двигателя при изменении частоты в среде MATLAB;

№9 – оформление пояснительной записки – окончательная проверка руководителем, устранение недочетов дипломником, подготовку к защите, подготовка презентации;

№ 10 – Проверка выпускной квалификационной работы руководителем - в рамках учебно-практической работы, включает в себя окончательную проверку руководителем, устранение недочетов дипломником.

№ 11 – Подготовка к защите ВКР – подготовка презентации, согласование с преподавателем для защиты перед аттестационной государственной комиссией.

7.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников выполнения проекта.

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в рабочих-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов. Методика оценки приведена в [19]. Для определения, ожидаемого значения трудоемкости i тож используется следующая формула

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5}, \quad (1)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы раб.дн.;

$t_{min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Результаты расчетов продолжительности выполнения работ приведены в таблице 8

Таблица 8 – Расчет продолжительности выполнения работ, раб.дней

№ этапа работ	Вид работ	Исполнители	Минимально возможная трудоемкость	Максимально возможная трудоемкость	Ожидаемая трудоемкость
1	Составление ТЗ	Руководитель	1	1	1
2	Сбор и изучение литературы	Дипломник	6	10	8
3	Сбор исходных данных	Дипломник	7	10	9
4	Подготовка для ввода в базу	Дипломник	6	10	10
5	Отладка данных и проведение расчетов	Дипломник	11	13	13
		Руководитель	1	2	2
6	Выбор оборудования	Дипломник	2	4	2
7	Расчёт и проверка модели АД	Дипломник	12	14	13
		Руководитель	1	3	2
8	Расчет и проверка АД-ПЧ	Дипломник	11	14	13
		Руководитель	1	3	2
9	Оформление пояснительной записки	Дипломник	5	9	7
		Руководитель	1	2	1
10	Проверка ВКР руководителем	Руководитель	1	3	2
11	Подготовка к защите ВКР	Дипломник	1	3	2
		Руководитель	1	2	1

В качестве графика инженерных работ можно использовать диаграмму Ганта. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.[19]

Исходя из диаграммы продолжительности работ, определяется участие каждого специалиста рабочей группы в разработке проекта: руководитель 11 рабочих дней, дипломник 77 рабочих дней. Общая продолжительность выполнения ВКР с 04.03.19 по 07.06.19 составила 96 календарных дней из них 80 рабочих дней.

7.2.2 Составление сметы технического проекта

При планировании сметы технического проекта (ТП) должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы ТП используется группировка затрат по следующим статьям:

- полная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

7.2.3 Полная заработная плата исполнителей ВКР

В этом разделе включена основная и дополнительная заработная плата всех исполнителей, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Основная заработная плата исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot Т_{\text{р}}, \quad (3)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

$Т_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн. (табл. 1.6).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{тс}}}{F_{\text{д}}}, \quad (4)$$

где $З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$F_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в месяце, раб. дн.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 9

Таблица 9– Расчёт основной заработной платы исполнителей

Исполнители	Оклад	Зарплата месячная, руб.	Средне- дневная заработная плата в день, руб.	Продолжит ельность работ, раб. дней	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	33664	43763	1683	11	18513
Дипломник	12300	15990	615	77	47355
Итого, $З_{\text{осн}}$, руб.					65868

Дополнительная заработная плата, составляет 12-15% от основной. Расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 10.

Таблица 10. – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Полная заработной плата, руб.
Руководитель	0,15	18513	2777	21300
Дипломник	0,12	47355	5682	53000
Итого				74300

7.2.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются: обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам, органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС), страхование от несчастных случаев; от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot З_{осн}, \quad (5)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды $k_{внеб} = 30,2 \%$ в условиях ТПУ.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 74,3 = 22,4 \text{ тыс. руб.}$$

7.2.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, и т.д. Величину накладных расходов принимаем в размере 16% от общей суммы затрат.

7.3 Формирование сметы технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции. [19]

Определение затрат на технический проект приведен в таблице 11

Таблица 11 – Смета технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
Полная заработная плата исполнителей темы	74,3	64,5
Отчисления во внебюджетные фонды	22,4	19,5
Накладные расходы	18,3	16,0
Итого	115,0	100,0

Исходя из представленной выше таблицы 1.9, можно сделать вывод, что смета затрат на выполнение технического проекта составляет 115 тыс.руб. Большая часть(64,5 %) составляют затраты на оплату труда.

7.4 Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности [11] проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (6)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Для определения ресурсоэффективности проекта по проектированию асинхронного электропривода магистрального насоса теплосети рекомендуется рассмотреть следующие критерии:

- Надежность магистрального насоса – это длительный эксплуатационный ресурс, электроснабжение обеспечивается дополнительным резервным

питанием, что в свою очередь позволяет обеспечить безаварийность и бесперебойность в работе.

- Энергосбережение магистрального насоса – это экономия электрической энергии. Энергосбережение достигается за счет оптимального подбора мощности электродвигателей, использование частотно-регулируемого привода.

- Материалоемкость магистрального насоса – это показатель расхода энергии для работы в номинальном режиме. При проектировании магистрального насоса теплосети нужно учитывать, что его работа является непрерывно-постоянной и остановки производить только для его обслуживания. Поэтому подбор осуществлялся таким образом, что при тех же условиях подобрать насос который бы расходовал меньше энергии.

- Производительность магистрального насоса – должна обеспечить стабильную подачу воды в теплоцентраль. Производительность достигается за счет правильного расчета и подбора насоса для тех условий в которых он будет работать, и использование качественных материалов на трубопроводы во избежание не нужных утечек.

- Удобство магистрального насоса – это возможность лёгкой настройки, монтажа и демонтажа магистрального насоса. Удобство монтажа и демонтажа осуществляется в отсутствие большого количества резьбовых соединений, в данной конструкции используются клиновые зажимы, а легкость в настройке и управлении обеспечит частотный преобразователь.

- Производительности труда – это показатель, характеризующий результативность труда, обеспечивается в проекте благодаря автоматизации, но при этом капиталовложения возрастают. Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
Надежность	0,25	5
Энергосбережение	0,20	5
Материалоемкость	0,15	4
Производительность	0,15	4
Удобство	0,15	5
Безопасность	0,10	4
Итого:	1,00	4,6

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{pi}=5\cdot0,25+5\cdot0,20+4\cdot0,15+4\cdot0,15+5\cdot0,15+4\cdot0,10=4,6$$

С точки зрения коммерческого потенциала и перспективности разработки проекта отметим следующее:

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5 балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы надежности позволяют судить о надежности системы. В данном разделе были рассмотрены и раскрыты следующие вопросы: - произведен SWOT-анализ, который выявил, приоритетные стороны этого проекта, указывающие на перспективность проекта в целом. Кроме того, угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта. - составлена диаграмма продолжительности работ, позволяющая скоординировать работу исполнителей.

- Рассчитана смета затрат на выполнение технического проекта, которая составила 115 тыс.руб. - определен показатель ресурсоэффективности проекта, который имеет достаточно высокое значение – 4,6 (по 5- балльной шкале)

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
З-5Г4А1	Гордеев Евгений Борисович

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Регулируемый электропривод теплосети

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является асинхронный двигатель магистрального насоса. Рабочей зоной является теплосеть. Область применения асинхронного двигателя магистрального насоса, обеспечение системы теплоснабжения.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды. 2.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды. 2.3. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. Анализ следующих вредных факторов: - Шум; - Повышенный уровень вибрации - Отклонение показателей микроклимата; - Недостаточная освещенность рабочей зоны. 2. Анализ следующих опасных факторов: - Поражение электрическим током. - Движущиеся части производственного оборудования
3. Экологическая безопасность:	- Бытовые отходы. Отходы, образующиеся при поломке элементов электропривода.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	- Возможные ЧС: технические сбои, аварии, пожар.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова Анна Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5Г4А1	Гордеев Евгений Борисович		

8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Работа человека на производстве нередко приводит к получению различных травм и заболеваний. С целью предотвращения или уменьшения последствий опасных и вредных факторов существует наука об охране труда.

Электропривод магистрального насоса системы теплоснабжения является частью основного технологического оборудования и должен обеспечивать надёжную и непрерывную работу в течение всего срока эксплуатации. В качестве основного элемента электропривода используется частотный преобразователь марки FDU производства шведской фирмы «Emotron AB». С целью поддержания системы электропривода в исправном и работоспособном состоянии на протяжении всего срока эксплуатации, предусмотрены следующие мероприятия:

- периодические осмотры устройства регулирования, оперативным персоналом один раз за смену;
- регулировочные мероприятия и осмотр устройства управления, оперативно-ремонтным персоналом ежемесячно;
 - техническое обслуживание два раза в год;
 - текущий ремонт один раз в год.

Работы по обслуживанию и ремонту электропривода, проводимые оперативно-ремонтным и ремонтным персоналом, ведутся на технологическом оборудовании и вблизи него, находящегося под избыточным давлением теплоносителя, незначительный выход которого возможен при монтаже датчика давления входящего в данную систему регулирования. Работы по обслуживанию и устройства управления, имеющего щитовое исполнение и находящегося в помещении операторной, ведутся при искусственном освещении.

Целью данного раздела является анализ вредных и опасных факторов при наладке и эксплуатации регулируемого электропривода магистрального

насоса, мероприятия по устранению действия вредных и опасных факторов, анализ пожаробезопасности при разработке системы мероприятий по предотвращению пожаров и загораний.

8.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Организация рабочего места заключается в выполнении ряда мероприятий, обеспечивающих рациональный и безопасный трудовой процесс, и эффективное использование орудий и предметов труда, что повышает производительность и способствует снижению утомляемости рабочих.

Нормальная продолжительность рабочего времени для работников комбината не может превышать 40 часов в неделю. Основной рабочей неделей для работников комбината является – пятидневная неделя.

Режим рабочего времени работников комбината, работающих в одну смену, устанавливается:

При 5-ти дневной рабочей неделе:

- начало работы — 8.00;
- перерыв — 11.45 — 12.45 , 15 минут.
- окончание работы — 17.00.

Безопасный трудовой процесс конструкция электроустановок должна соответствовать условиям их эксплуатации и обеспечивать защиту персонала от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями, а оборудования от попадания внутрь посторонних тел и воды.

Работы должны выполнять рабочий персонал прошедший медицинский осмотр, вводный инструктаж, первичный на рабочем месте, дублирование на рабочем месте, сдать экзамены на присвоение группы по электробезопасности,

владеть навыками оказания первой медицинской помощи, уметь освобождать пострадавшего находящегося под напряжением.

Работы, проводимые на электрооборудовании должны оформляться на бланках установленной формы с дальнейшей записью в оперативном журнале. Приступать к работам может только электротехнический персонал с 3 группой по электробезопасности до 1000 В.

8.2 Организация рабочего места машиниста насосной станции.

Для работающих, участвующих в технологическом процессе по обслуживанию и наблюдению за работой насосной станции, должны быть обеспечены удобные рабочие места, не стесняющие их действий во время выполнения работы. На рабочих местах должна быть предусмотрена площадь, на которой размещаются необходимые устройства для управления и контроля над ходом технологического процесса, а также средства сигнализации и оповещения об аварийных ситуациях.

Насосная станция - это замкнутое помещение, в котором необходимо создать условия для работы обслуживающего персонала. Насосы с их приводами являются сильными источниками тепла в помещении. Например, некоторые части насосной установки (электродвигателя) нагреты постоянно свыше 100 °С. Эти источники тепла достаточно серьезно влияют на микроклимат внутри насосной станции. В летние месяцы работы насосной станции температура воздуха в помещении может достигать уровня, при котором невозможен комфортный и производительный труд человека. К тому же в любом помещении необходима периодическая замена воздуха.

Рабочее место машиниста для обеспечения производственной деятельности оборудуется креслом (стулом, сиденьем) с регулируемым наклоном спинки и высотой сиденья. Эргономические требования при

выполнении работ сидя и стоя приведены в ГОСТ 12.2.032-78, ГОСТ 12.2.033-78.

8.3 Производственная безопасность

При эксплуатации насосной установки возможно воздействие на человека следующих опасных и вредных производственных факторов представленных в таблице 13.

Таблица 13 Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разраб отка	Изготов ление	Эксплу атация	
1.Поражение электрическим током;			+	ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.[9]
2. Воздействие вращающихся частей;			+	ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.[10]
3. Повышенный уровень вибраций;			+	Допустимый уровень вибрации по ГОСТ 12.1.003-83-99 ССБТ [11]
4. Повышенный уровень шума			+	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки; СП 51.13330.2011. Защита от шума. [11]
5. Неблагоприятный микроклимат рабочей зоны			+	Микроклимат производственного помещения характеризуется согласно [12]: СанПиН 2.2.4.548-96
6.Недостаточная освещенность рабочей зоны			+	Требуемая норма освещения Е _{нор} =200 ЛК. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95[13].

8.3.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды

Неблагоприятные условия окружающей среды вредно воздействуют на организм работающего, снижают реакцию, повышают утомляемость. К

производственным вредным факторамна рассматриваемом производстве относятся:

Шум классифицируются как активные, то есть они могут оказать воздействие на человека посредством заключенных в них энергетических ресурсов,при длительном воздействии приводят к заболеванию нервной системы, а более 100 дБ - к снижению слуха, вплоть до глухоты. Уровень шума вырабатываемый насосами представлен в таблице 2.

Шум возникает вследствие упругих колебаний как машины в целом, так и отдельных ее деталей. Причины возникновения этих колебания механические, аэродинамические, гидродинамические и электрические явления, определяемые конструкцией и характером работы машины, а также неточностями, допущенными при ее изготовлении, и, наконец, условиями эксплуатации. В связи с этим различают шумы механического, аэродинамического, гидродинамического и электромагнитного происхождения.

Основными источниками шума, происхождение которого не связано непосредственно с технологическими операциями, выполняемыми машиной, являются прежде всего подшипники качения и зубчатые передачи, а также неуравновешенные вращающиеся части машины.

Шум уровня до 65 дБ вызывает раздражение, носящее лишь психологический характер. Особенно отрицательно такой шум сказывается при умственной работе. Зачастую такой шум, производимый самим человеком, не беспокоит его, в то время как посторонний вызывает раздражение.

При уровне шума $65 - 85 \text{ дБ}$ возможно его физиологическое воздействие. Через волокна слуховых нервов раздражение шумом передается в центральную и вегетативную нервную системы, а через них воздействует на внутренние органы, приводя к изменениям в функциональном состоянии организма, влияет на психическое состояние человека. Так, при указанном уровне шума, пульс и

давление крови повышаются, сосуды сужаются, что снижает снабжение организма кровью, и человек быстрее устает.

Установлено, что при работах, требующих внимания, при увеличении уровня шума с 65 до 85 дБ имеет место снижение производительности труда на 30%. Воздействие шума уровнем 85 дБ и выше приводит к нарушениям органов слуха. Риск потери слуха у работающих при шуме 85 дБ составляет 3%, при 90 дБ - 10 %, при 100 дБ - 29 %. Кроме того, усиливается влияние шума на систему кровообращения, ухудшается деятельность желудка и кишечника, появляются ощущения тошноты, головная боль и шум в ушах. **Вибрация** низкочастотная общая вибрация вызывает длительную травматизацию межпозвоночных дисков и костной ткани, смещение органов

в брюшной полости, возникновение и прогрессирование дегенеративных изменений позвоночника.

Причиной вибрации являются возникающие при работе машин и агрегатов неуравновешенные силовые воздействия. Их источниками могут быть возвратно-поступательные движущиеся системы, неуравновешенные вращающиеся массы, ударные процессы.

Неблагоприятный микроклимат рабочей зоны

Вредное воздействие параметров микроклимата проявляется в повышенной или пониженной температуре воздуха рабочей зоны, повышенной или пониженной влажности воздуха, повышенной или пониженной подвижности воздуха.

На состояние человеческого организма большое влияние оказывают метеорологические условия в производственных помещениях. Так, например, температура, влажность, и скорость перемещения воздуха влияют на теплообмен между телом человека и окружающей средой.

Состояние воздушной среды производственного помещения в значительной степени определяет условия труда. Поэтому санитарными

правилами обуславливается обеспечение нормальных метеорологических условий.

На рабочем месте машиниста, производственная деятельность которого связана с проведением операций по управлению насосами, а также сопряжена с физическим напряжением (перемещение в пространстве, перемещением мелких изделий или предметов при выполнении работ как сидя, так и стоя), характеристику категории работы можно отнести к Па.

Рекомендуется для создания оптимальной работоспособности необходимо соблюдать следующие оптимальные и допустимые параметры микроклимата указанные в таблице 14.

Таблица 14 Оптимальные нормы микроклимата на рабочем месте

Период года	Температура	Относительная влажность	Скорость движения воздуха
Холодный	19-21	40-60	0,1
Теплый	20-22	40-60	0,2

Факторы связанные со световой средой (недостаточная освещенность рабочей зоны)

Безопасность на производстве в значительной мере зависит от освещения. Свет влияет на физиологическое состояние человека, правильно организованное освещение стимулирует протекание процессов высшей нервной деятельности и повышает работоспособность. При недостаточном освещении человек работает менее продуктивно, быстро устает, растет вероятность ошибочных действий, что может привести к травматизму.

Освещённость на рабочем месте должна соответствовать характеру зрительной работы. В данном случае работы относятся к разряду IV Г [17]. Требуемая норма освещения $E_{нор}=200$ ЛК. Для создания $E_{нор}$ применяется совмещенное освещение: естественное и общее люминесцентное освещение.

Для создания рациональных условий освещения большое значение имеет тщательный и регулярный уход за установками естественного и искусственного освещения.

8.3.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды

Наличие высокого напряжения, поражение электрическим током при обслуживании электрооборудования

К работам по наладке электропривода допускаются не менее двух человек по письменному разрешению руководителя. При настройке схем, замене предохранителей и т.д. необходимо использовать приборы и средства защиты, предназначенные для работ на электроустановках до 1000 В

Средства защиты, к которым относятся резиновые галоши, коврики, изоляция инструмента и т.д., должны проверяться перед каждым использованием. При наладке привода необходимо применение запрещающих и предупреждающих плакатов. Испытание электропривода осуществляется сначала на холостом ходу, а затем под нагрузкой.

Виды электротравм: местные, когда возникает местное повреждение организма; общие, так называемый электрический удар, когда непосредственно нарушается весь организм, из-за нарушения нормальной деятельности жизненно важных органов и систем.

Местные электротравмы – это ярко выраженное местное нарушение целостности тканей тела, в том числе костных тканей, вызванное воздействием электрического тока или электрической дуги. Чаще всего это поверхностные повреждения, т. е. поражение кожи, а иногда и других мягких тканей, а также связок и костей. Опасность местных травм и сложность их лечения зависит от места, характера и степени повреждения тканей, реакции организма на это повреждение. Как правило, местные электротравмы излечиваются, и

работоспособность пострадавшего восстанавливается полностью или частично. Смерть от местных электротравм - редкий случай (обычно при тяжелом ожоге человек погибает). Причиной смерти при этом является не ток, а местное повреждение организма, вызванное током.

Характерные местные электротравмы.

- электроожоги – 40 %
- электрические знаки – 7 %
- металлизация кожи – 3 %
- механические повреждения – 0,5 %
- Электроофтальмия – 1,5 %
- Смешанные (ожоги + др. местные электротравмы) – 23 %

Элетроожог – самая распространенная электротравма. Возникает у 63 % пострадавших от электротока. 23 % (т.е. треть из них) сопровождается другими травмами. 85 % ожогов приходится на электромонтеров, обслуживающих действующие ЭУ.

Движущиеся части производственного оборудования, могут являть причиной травмы, попадание человека под вращающиеся части электрического оборудования.

Под вращающимися частями электрооборудования можно оказаться в случае, если:

- во время работы насосов производить проверку степени нагрева подшипников руками;
- подтягивать болты фланцевых соединений на шламопроводах, находящихся под давлением;
- допускать работу насоса при утечке шлама из трубопроводов, фланцевых соединений, сальников;
- подтягивать крепежные болты во время работы насоса;
- ходить по трубопроводам;

8.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов

Опасные и вредные факторы	Мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов
Поражение электрическим током	<p>Перед включением осуществить проверку правильности фазы и напряжения.</p> <p>Если напряжение высокое, желательно не включать насос, чтобы избежать поломки.</p> <p>Перед тем, как провести техобслуживание (даже минимальное), насос необходимо отключить от электросети.</p> <p>Если сработала защита от перегрузки, следующий запуск можно произвести не раньше, чем через 10 минут.</p>
Опасность травмирования вращающимися частями	Работы проводятся только в спецодежде, рукавицах, защитных очках на технически исправном оборудовании
Пожароопасность	<p>Не разрешается проводить работы в спецодежде и рукавицах со следами масел, жиров и горючих жидкостей. Расстояние до легковоспламеняющихся предметов не менее 5 метров. После окончания работ необходимо отключить аппараты от источника энергии.</p>
Вибрация	Для уменьшения вибрации станки и оборудование следует устанавливать на фундаменте углубленном ниже фундамента стен изолированном от почвы воздушными разрывами, либо на специально рассчитанных амортизаторах из стальных пружин.
Шум	<p>Одним из методов борьбы с шумом является применение звукопоглощающих материалов для облицовки стен, потолков и пола производственных помещений. В качестве оперативного способа профилактики вредного воздействия шума на работающих целесообразно использовать средства индивидуальной защиты, в частности противοшумные наушники.</p> <p>Средства индивидуальной защиты: наушники снижают уровень звукового давления от 3 до 36 дБ.</p>

8.5 Экологическая безопасность

Организация природопользования и обеспечения экологической безопасности включает в себя работу по следующим направлениям:

- а) Регулирование процесса выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.
- б) Регулирование процесса сброса загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты.
- в) Регулирование процесса образования, использования и размещения бытовых и производственных отходов.

В целях охраны воздушной среды от загрязнения вредными выбросами предусмотрены следующие мероприятия:

- применение герметизированной системы по всей технологической цепочке;
- контроль, автоматизация технологических процессов; постоянный автоматический контроль загазованности в местах максимально возможного выделения;
- осуществление производственного экологического контроля за промышленными выбросами;

8.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В данном технологическом процессе может возникнуть пожар из-за короткого замыкания, вызывающих высокую температуру нагрева проводников, что приводит к воспламенению изоляционного материала.

На рабочем месте каждый электропривод оборудования должен быть оснащен защищенной аппаратурой. Должна быть предусмотрена блокировка и защита на случай короткого замыкания и перегрузок. Установлены системы предотвращения пожара и противопожарной защиты.

8.6.1 Защита электрооборудования от короткого замыкания и перегрузок

Защита электрооборудования и электрических сетей от токов короткого замыкания и значительных по величине и продолжительных перегрузок осуществляется предохранителями с плавкими вставками и автоматическими выключателями. При выборе аппаратов защиты должны быть соблюдены следующие условия:

- номинальное напряжение предохранителя должно быть равно или больше номинального напряжения сети
- плавкая вставка предохранителя не должна плавиться при расчетном токе
- плавкая вставка не должна расплавляться при пиковых токах

8.6.2 Воспламенения изоляции в следствии повышения температуры

С физической точки зрения, источниками загорания, проявляющимися при описанных аварийных электрических режимах, являются:

а) сильное тепловыделение при прохождении тока. Это может происходить по причине несоответствия величины протекающего тока и сечения

проводника – либо за счет того, что ток слишком велик для данного

штатного проводника (перегрузка) или микроканала, по которому проходит

ток утечки (нагрев при не полном коротком замыкании

б) искры, возникающие при больших переходных сопротивлениях, а так же работе коммутационных устройств другого искрящего

«электрооборудования»;

в) макродуги, возникающие при коротком замыкании;

г) раскаленные частицы и капли расплавленного металла, образующиеся при

коротком замыкании

При анализе версий обычно учитывают, что источники зажигания как правило проявляют себя не поодиночке, а в комплексе. И при коротком замыкании, и при перегрузке, и больших переходных сопротивлениях часто имеет место сочетание последовательно или параллельно протекающих физических процессов и в каждом из них в ходе развития может проявиться несколько указанных факторов:

- при металлическом коротком замыкании – электрическая дуга с присущими

«опасными факторами», но, плюс к этому, может проявиться и перегрузка за счет прохождения по электрической цепи тока короткого замыкания

- при неметаллическом коротком замыкании – утечка тока, нагрев изоляции,

и ее карбонизация, разложение (если она представляет собой органический материал), но, в конечном счете, дело может закончиться пробоем и электрической дугой, опять же, с присущими ей «опасными факторами» и характерными следами (дуговыми оплавлениями)

- при перегрузке – нагрев проводников на протяженном участке и более сильный – в локальных зонах БПС. Если последние присутствуют в электрической цепи, то горение при перегрузке, скорее всего, возникнет в зоне их нахождения, если там имеются соответствующие горючие материалы. Если нет, то изоляция перегруженного провода может загореться в любом другом месте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалификационной работы являлся вопрос исследования возможной структуры РЭП насоса на основе комплектного преобразователя частоты FDU 40-090 СЕВ.

В работе предложено реализовать систему РЭП насоса как систему автоматического управления, выполненную на модульной, программно - перестраиваемой структуре с возможностью реализации законов скалярного управления по разомкнутой структуре, а также законов векторного управления с замкнутыми контурами тока, потока и давления.

В результате исследования статического режима работы скалярного управления установлено, что электропривод обеспечивает заданную область работы в указанном диапазоне регулирования скорости, что удовлетворяет техническому заданию.

В ходе имитационного моделирования динамических режимов работы установлено, что разработанная система отрабатывает заданную диаграмму движения, обеспечивая требуемые показатели качества:

- давление выходит на заданное значение с величиной перерегулирования не более 0,01 базового значения;
- время переходного процесса не превышает 3 с.

Преимущество векторного закона регулирования над скалярным заключается в повышенном качестве переходных характеристик, однако при этом необходимо осуществить настройку регуляторов контуров потока и тока, правильно выбрав постоянные времени контуров. Процесс оптимизации параллельных контуров соответствует оптимизации системы двухзонного электропривода постоянного тока без учёта влияния перекрёстных обратных связей. Скалярное управление обладает простотой и возможностью работы без обратной связи. Однако при этом необходимо обеспечить включение двигателя в момент пуска на малую частоту и напряжение для ограничения бросков тока и момента, что приводит к

затягиванию процесса разгона. В случае применения законов скалярного $U_1 / n_{\text{кС}} = \text{const}$ и векторного управления в системе РЭП насоса были получены приблизительно одинаковые результаты при отклонении нагрузки в большую и меньшую стороны от номинальной. Влияние упругих колебаний ДМС сильнее в системе скалярного управления. В системе векторного частотно-токового управления в момент пуска в соответствии с настройкой параметров регулятора переходный процесс тока должен иметь апериодический характер с максимальным значением $1,5 I_{\text{Б}}$, однако вследствие влияния отрицательной связи $k_2 n_r Y_{2x}$, в кривой тока и соответственно момента наблюдается провал.

Модели, построенные в работе, используют информацию напрямую без преобразовательных устройств. Это упрощение необходимо для осуществления настройки параметров регуляторов, т.к. реализация регуляторов возможна только во вращающейся системе. В реальных системах используется прямое и обратное преобразование координат.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» выполнен технический проект и решены следующие задачи:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителя.

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,6 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

Реализация данного технического проекта, позволяет увеличить эффективность производства участка путем улучшения энергоэффективности, энергосбережения при внедрении более универсального оборудования, требующего меньше затрат при эксплуатации.

Таким образом, разработанная система РЭП насоса полностью удовлетворяет техническим требованиям.

CONCLUSION

The purpose of the given final qualifying work was the question of research of possible(probable) structure REP of the pump on the basis of the complete converter of frequency FDU 40-090 CEB.

In work it is offered to realize system REP of the pump as the system of automatic control executed on modular, program - reconstruct to structure with an opportunity of realization of laws of scalar management on open to structure, and also laws of vector management with the closed contours of a current, a stream and pressure.

As a result of research of a static mode of operation of scalar management it is established, that the electric drive provides the given area of work in the specified range of regulation of speed that satisfies to the technical project.

During imitating modelling dynamic modes of operation it is established, that the developed system fulfils the given diagram of movement, providing required parameters of quality:

- pressure leaves on a preset value with size regulation no more than 0,01 base values;
- time of transient does not exceed 3 with.

Advantage of the vector law of regulation above scalar concludes(consist) in the raised(increased) quality of transitive characteristics, however thus it is necessary to carry out adjustment of regulators of contours of a stream and that, correctly having chosen constants of time of contours. Process of optimization of parallel contours corresponds(meets) to optimization of system of the two-zoned electric drive of a direct current without taking into account influence of cross feedback. Scalar management has simplicity and an opportunity of work without a feedback. However thus it is necessary to provide inclusion of the engine at the moment of start-up on small frequency and a pressure(voltage) for restriction of throws of a current and the moment that results in a tightening of process of dispersal. In case of application of laws of scalar and vector management in system

REP of the pump approximately identical results were received at a deviation(rejection) of loading in the big and smaller parties(sides) from nominal. Influence of elastic fluctuations DMS is stronger in system of scalar management. In system vector it frequency - токового managements at the moment of start-up according to adjustment of parameters of a regulator transitive process of a current should to have аperiodический character with the maximal value, however owing to influence of negative communication (connection) in the second equation of system 3.33, in a curve of a current and accordingly the moment observe a failure.

The Models constructed in work, use the information directly without converting devices. This simplification is necessary for realization of adjustment of parameters of regulators, since realization of regulators possible(probable) only in rotating system. In real systems direct and return transformation of coordinates is used.

In the feasibility report on application REP the opportunity of realization of a mode energy the savings is considered at decrease(reduction) of thermal loading. The analysis of structure and cost PNR is carried out(spent), the estimate on work is made, the diagram of their performance is constructed. Safety issues and ecology the project are considered.

Thus, developed system REP of the pump completely satisfies to technical requirements.

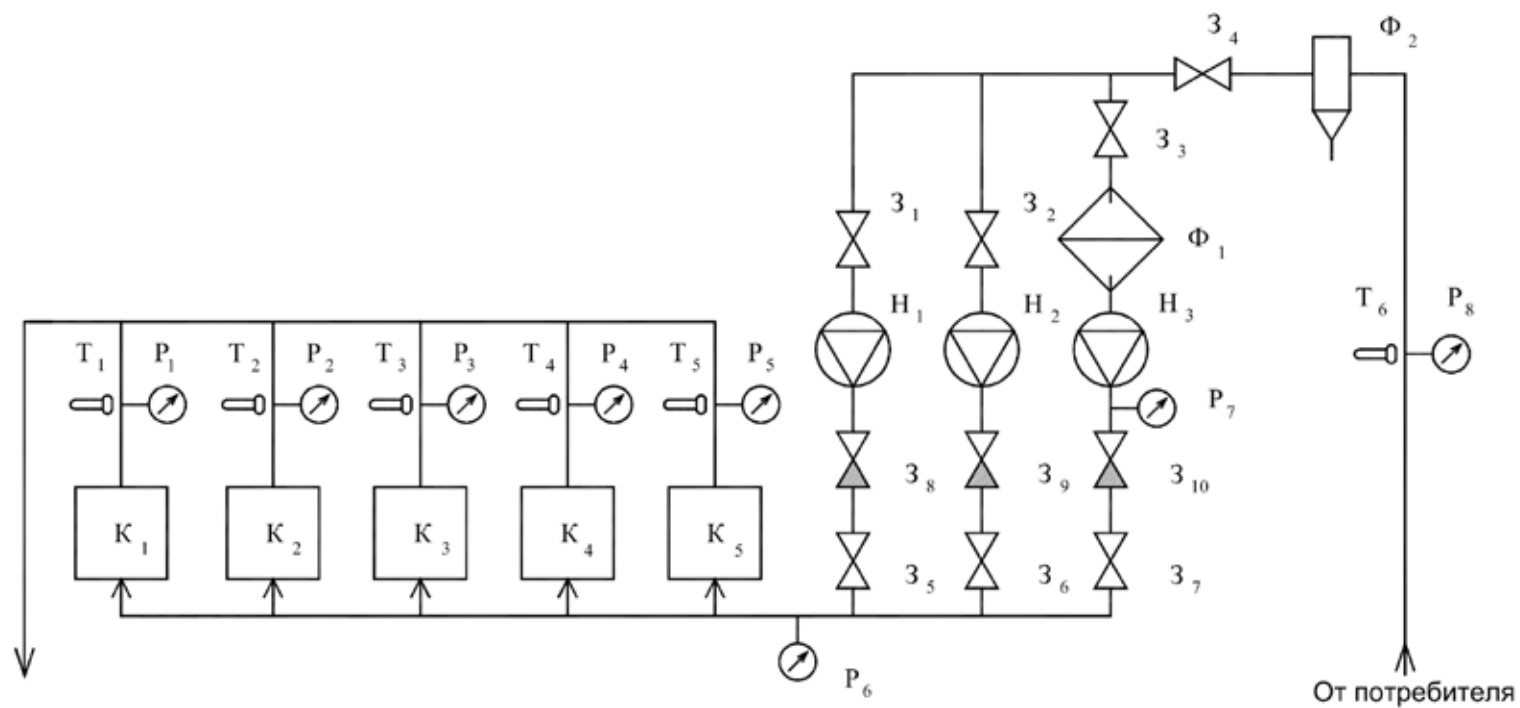
Список использованных источников

1. Насосы с «сухим ротором»: GRUNDFOS КАТАЛОГ 2003, М.: Грундфос, 2003. 118 с.
2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ FLOWDRIVE™ FDU: Руководство по эксплуатации /Перевод от 12 апреля 2003 г., М.: АДЛ, 2003. 83 с.
3. Манотомь: Номенклатурный каталог изделий/Томск: 2002. 35 с.
4. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых электроприводах. – Чебоксары: 1998. 172 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. – Спб.: 2001. 320 с.
6. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. Елисеева и Шинянского. – М.: Энергоатомиздат: 1983. 616 с.
7. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат. 1982.
8. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
9. Гусяцкий Ю.М. Синтез быстродействующей системы частотно-управляемого асинхронного электропривода // Электричество. 1982. №10.
10. Кояин Н.В., Удут Л.С., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.5. Применение программы WINDORA в расчетах электроприводов постоянного тока: Учеб. пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – 156 с.
11. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. М.: Энергоатомиздат, 1985.
12. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
13. Кривицкий С.О., Эпштейн И.И. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами. М: Энергия, 1970

14. Коррекция автоколебаний в системе преобразователь частоты – двигатель / Д.Д. Богаченко, А.А.Керимбаев // Электротехника, 1995, №1.
15. Безопасность жизнедеятельности./ Под ред. С.В. Белов. – М.: Высш. шк., 1999. – 448 с.
16. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник/ Под ред. А.Н.Баратова –М.: Энергия, 1987.
17. Правила устройства электроустановок, М.: Энергоатомиздат, 1999.
18. Справочная книга по светотехнике./Под ред. Ю.Б.Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1995. 205 с.
19. Коршунова Л. А., Кузьмина Н. Г. Техничко-экономическое обоснование инновационного проекта. Методические указания по выполнению экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
20. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: (Вторая редакция) / М-возкон. РФ, М-во фин. РФ, ГК по стр-ву, архит. и жил. политике; рук. авт. кол.: Коссов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. - М.: ОАО "НПО "Изд-во "Экономика", 2000.
21. ГОСТ 12.1.005.-88 ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования.
22. ГОСТ 12.3.003.-75 ССБТ. Работы электросварочные. Общие требования безопасности.
23. ГОСТ 17.0.0.04-90. Паспорт промышленного предприятия. Основные положения
24. СнИП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.
25. Мазур И.И., Молдаванов О.И., Шишов В.Н. Инженерная экология. Т.1. – М.: Высшая школа, 1996.

Приложение А

Технологическая схема котельной системы теплоснабжения

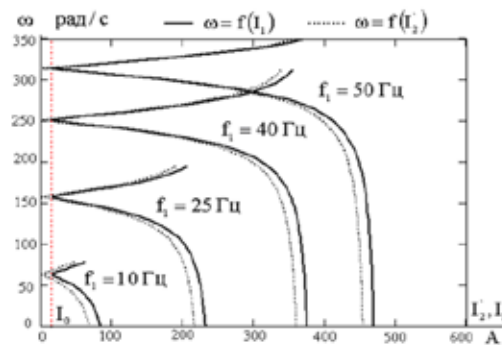


T - датчик температуры;
P - датчик давления;
З - клапан;
К - водонагревательный котел;
Φ - фильтр;
Н - насос.

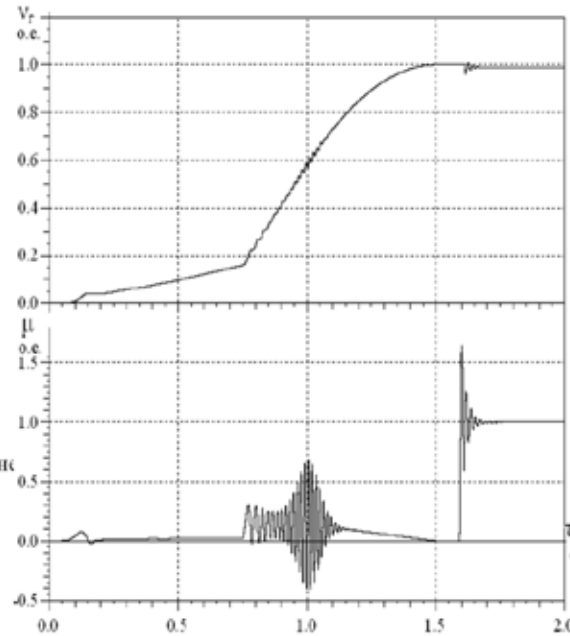
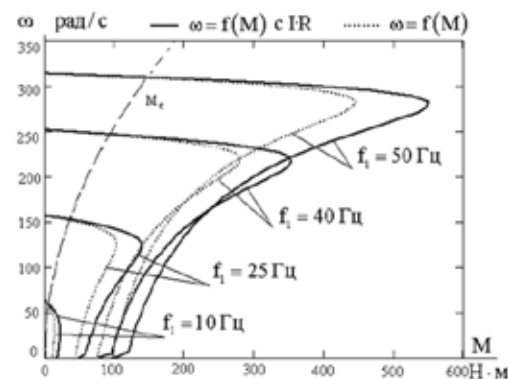
Временные характеристики $n_r = f(\phi)$, $m = f(\phi)$ при пуске АД на холостом ходу и набросом нагрузки $T_v = 500 \text{ о.е.}$, $T_b = 1500 \text{ о.е.}$

Временные характеристики $n_r = f(\phi)$, $m = f(\phi)$ при пуске АД под нагрузкой и сбросом нагрузки $T_v = 500 \text{ о.е.}$, $T_b = 1500 \text{ о.е.}$

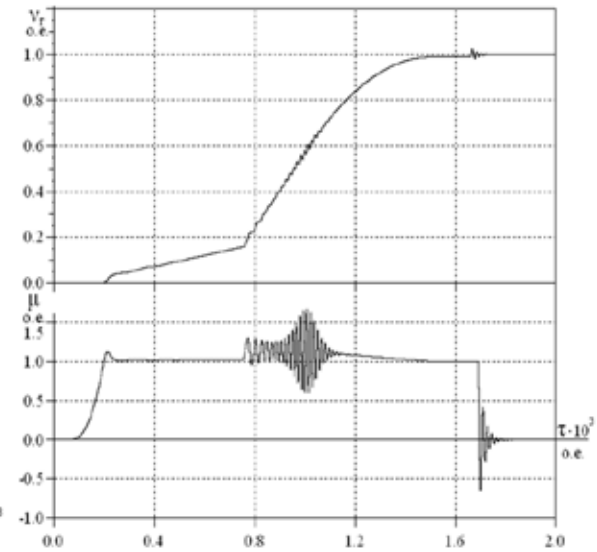
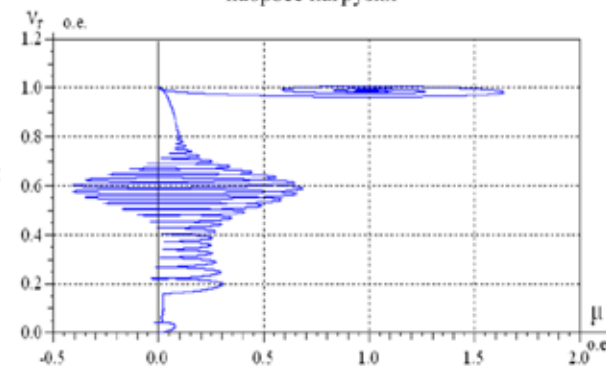
Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования $U_{\text{лф}}/I_1^2 = \text{const}$



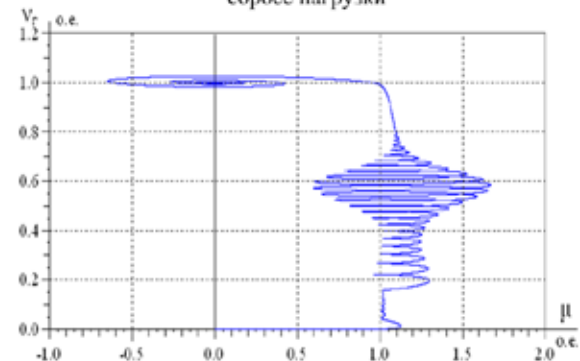
Механические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{\text{лф}}/I_1^2 = \text{const}$



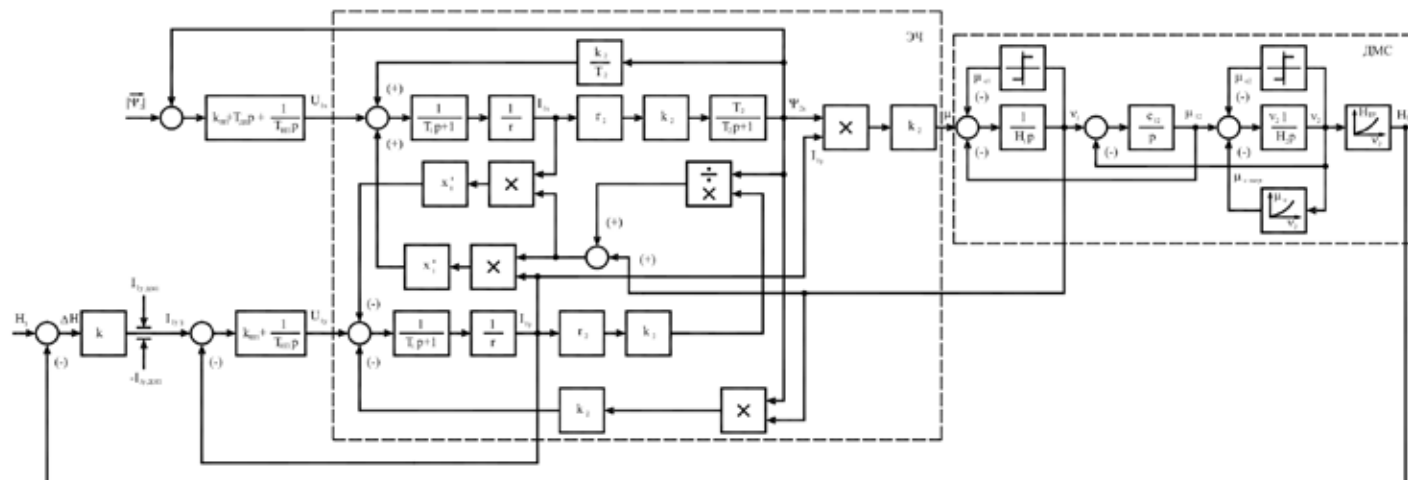
Динамическая механическая характеристика при набросе нагрузки



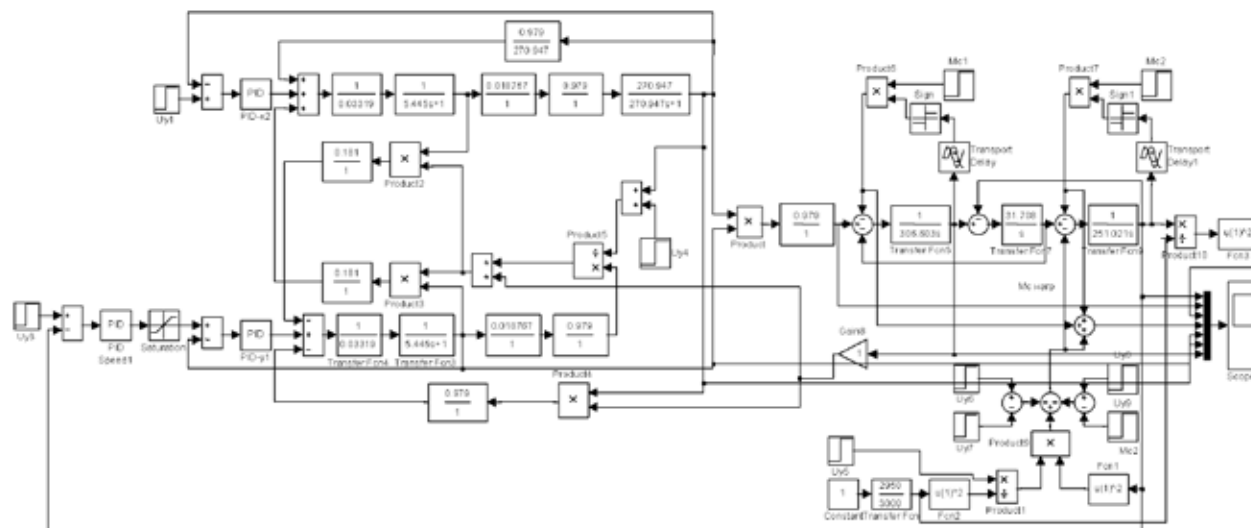
Динамическая механическая характеристика при сбросе нагрузки

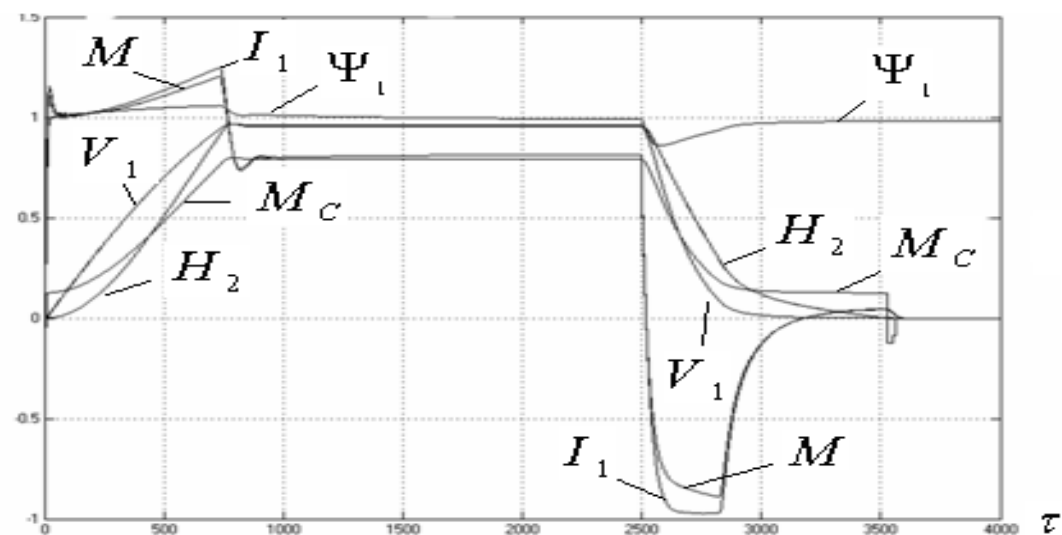


Структурная схема частотно-токового векторного управления с $\|\Pi\|_2 = \text{const}$ и прямой ориентацией по вектору $\|\Pi\|_2$ с регуляторами тока, потока и давления

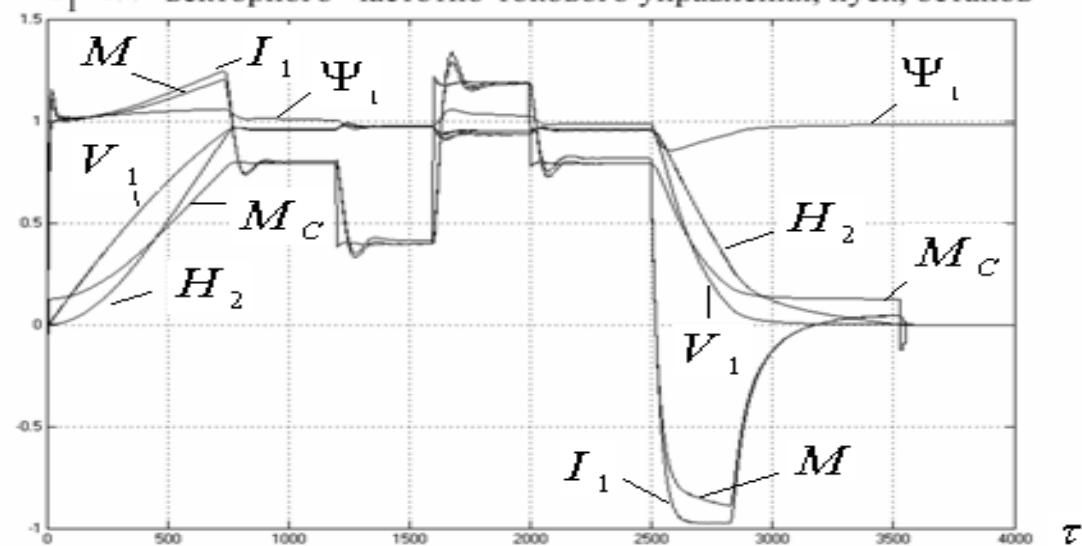


Имитационная модель





Динамические характеристики $v_1, v_2 = f(\tau)$; $\mu, \mu_c = f(\tau)$; $I_1 = f(\tau)$; $H_{TP} = f(\tau)$; $\Psi_1 = f(\tau)$ векторного частотно-токового управления, пуск, останов



Динамические характеристики $v_1, v_2 = f(\tau)$; $\mu, \mu_c = f(\tau)$; $I_1 = f(\tau)$; $H_{TP} = f(\tau)$; $\Psi_1 = f(\tau)$ векторного частотно-токового управления, пуск, сброс нагрузки до $\mu_c = 0.5 \cdot \mu_{c \text{ ном}}$ и наброс до $\mu_c = 1.5 \cdot \mu_{c \text{ ном}}$